T. 10, 2

3me CYCLE
D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

N° d'ordre : 213

THÈSE

PRÉSENTÉE A

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX I

POUR L'OBTENTION DU TITRE DE

DOCTEUR - INGÉNIEUR

PAR

Jean-Claude BOISSON
INGÉNIEUR E.N.S.C.M. BESANÇON
ASSISTANT A L'I.U.T. « A »

Étude statistique de l'effet de sous charge au cours d'un traitement de fatigue par torsion alternée.

Soutenue le 20 décembre 1974, devant la Commission d'Examen :

MM. P. LOUDETTE, Professeur ..... *Président.*
F. JOUBERT, Professeur .....
F. BASTENAIRE, Docteur ès Sciences I.R.S.I.D. ..... *Examinateurs.*
D. SPATARO, Maître-Assistant .....

— 1974 —

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549623_0010

3me CYCLE
D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

N° d'ordre : 213

THÈSE

PRÉSENTÉE A

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX I

POUR L'OBTENTION DU TITRE DE

DOCTEUR - INGÉNIEUR

PAR

Jean-Claude BOISSON

INGÉNIEUR E N.S.C.M. BESANÇON
ASSISTANT A L'I.U.T. « A »

Étude statistique de l'effet de sous charge au cours d'un traitement de fatigue par torsion alternée.

Soutenue le 20 décembre 1974, devant la Commission d'Examen :

MM. P. LOUDETTE, Professeur ..... *Président.*
F. JOUBERT, Professeur .....
F. BASTENAIRE, Docteur ès Sciences I.R.S.I.D. ..... *Examinateurs.*
D. SPATARO, Maître-Assistant .....

— 1974 —

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Ce travail a été exécuté dans le cadre du Département des Sciences de l'Ingénieur de l'Université de BORDEAUX I. Qu'il me soit permis d'exprimer ma gratitude à son directeur, Monsieur le Professeur LOUDETTE, qui m'y a accueilli avec bienveillance.

Monsieur le Professeur JOUBERT m'a incité à entreprendre cette étude et en a attentivement suivi les développements. Qu'il trouve ici le témoignage de ma reconnaissance pour les conseils et les encouragements qu'il m'a prodigués.

Je remercie vivement Monsieur BASTENAIRE d'avoir accepté de distraire une partie de son temps pour me faire part de son expérience, me faire profiter de sa compétance et d'avoir bien voulu examiner ce travail.

Par son amicale sollicitude et ses conseils judicieux, Monsieur SPATARO a été un guide précieux, qu'il accepte ici mes chaleureux remerciements.

J'ai pu installer les moyens d'essais dans le département de Génie Mécanique de l'I.U.T. de BORDEAUX et bénéficier ainsi d'un environnement technologique particulièrement favorable. J'adresse mes remerciements à tous les membres du personnel technique et à tous les collègues qui m'ont, en nombreuses occasions, accordé une aide précieuse. Mon collègue, Monsieur TAP, m'a fait bénéficier de sa grande compétence pour exécuter l'usinage des éprouvettes. Je l'en remercie particulièrement.

PLAN DU MEMOIRE

	Page
AVANT-PROPOS	1
NOTATIONS	
INTRODUCTION	3
CHAPITRE PREMIER	5
RAPPELS SUR LA FATIGUE DES METAUX	5
I - GENERALITES SUR LA FATIGUE DES MATERIAUX	5
I - 1. Etude de la courbe de WOHLER et définitions ...	5
I - 1.1. : Limite d'endurance (σ_D)	6
I - 1.2. : Durée de vie	7
I - 1.3. : Fatigue oligocyclique - (fig. 1-3)	7
I - 2. Les sollicitations dans les essais de fatigue .	7
I - 2.1. : Sollicitations alternées	7
I - 2.2. : Sollicitations répétées	8
I - 2.3. : Représentations des résultats	8
I - 3. Considérations théoriques sur la fatigue des matériaux	8
I - 3.1. : Les théories mécaniques de la fatigue	9
I - 3.2. : Les théories physiques	9
I - 3.3. : Les théories statistiques	10
I - 3.4. : Les théories du dommage	11
CHAPITRE DEUXIEME	13
ETUDE CRITIQUE DE L'EFFET DE SOUS CHARGE	13
II - 1. Généralités sur l'effet de sous charge	13
II - 2. Interprétation physique de l'effet de sous charge	14
II - 3. Etudes descriptives de l'effet de sous charge	14
II - 3.1. : Les méthodes directes d'étude de l'effet de sous charge	14
II - 3.1.1. Cas où l'on compare les effets d'un même traitement sur deux lots différenciés par un traitement antérieur appliqué à l'un d'eux	15
II - 3.1.2. Etude de l'effet de sous charge à l'aide d'essais sous charge progressive	17
II - 3.2. : Méthode indirecte d'étude de l'effet de sous charge	18
II - 3.2.1. Définition de traitements équivalents	19
II - 3.2.2. Bases d'une théorie du dommage défini par un paramètre (17)	19

II - 3.2.2.1. - Hypothèses du dommage à un paramètre :.. 19
II - 3.2.2.2. - Conception probabiliste du dommage défini par un paramètre 20
II - 3.2.3. L'effet de sous charge et la théorie du dommage à un paramètre 21
II - 4. Conclusions et schéma possible d'un dommage rendant compte de l'effet de sous charge 23
CHAPITRE TROISIEME 25
ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EFFET DE SOUS CHARGE 25
III - 1. Objet et but de l'étude 25
III - 2. Méthodes et moyens d'essai 25
III - 2.1. : Les méthodes statistiques d'essai 26
III - 2.1.1. La méthode des probits (22) 26
III - 2.1.2. La méthode en escalier (stair-case) de DIXON et MOOD (23) 26
III - 2.1.3. La méthode d'approximations successives ou d'itération de ROBBINS et MONRO (24) (25).. 27
III - 2.2. : Les machines d'essai 28
III - 3. Etudes préliminaires 30
III - 3.1. : Choix d'un matériau - éprouvettes 30
III - 3.1.1. Le matériau 30
III - 3.1.2. Les éprouvettes 31
III - 3.2. : Essais statiques 32
III - 3.2.1. Essais de traction 32
III - 3.2.2. Essais de torsion 32
III - 3.3. Tracé de la courbe de WOHLER de l'acier XC 10 f soumis à des sollicitations alternées de torsion 33
III - 4. Définition du programme d'essais 34
III - 4.1. : Les buts de ce programme 34
III - 4.2. : Description des essais 34
III - 4.2.1. Forme des essais - méthode de comparaison.. 35
III - 4.2.2. Définitions des grandeurs caractéristiques des essais 36
III - 4.2.3. Choix d'une méthode statistique 37
III - 5. Résultats des essais 38
III - 5.1. : Comportement de l'acier XC 10 dans la zone d'endurance 38

III - 5.1.1. Résultats de l'essai à un seul niveau ... 38
III - 5.1.2. Résultats de l'essai à deux niveaux 40
III - 5.1.3. Comparaison des résultats 41
III - 5.2. : Comportement de l'acier xC 10 dans la zone d'endurance limitée 41
III - 5.2.1. Résultats de l'essai à un seul niveau ... 43
III - 5.2.2. Résultats de l'essai à deux niveaux 43
III - 5.2.3. Comparaison des résultats 46
III - 5.3. : Etude de la validité des résultats 46
III - 5.3.1. Généralités 46
III - 5.3.2. Méthode de vérification 47
III - 5.3.3. Vérification des résultats des essais dans la zone d'endurance 47
III - 5.3.4. Vérification des résultats des essais dans la zone d'endurance limitée 48
III - 5.3.5. Conclusions sur la validité des résultats trouvés 49
III - 6. Discussion du programme d'essais 49
CONCLUSION 51
BIBLIOGRAPHIE 54

AVANT-PROPOS

Lorsqu'à l'initiative de Monsieur JOUBERT s'est constitué le groupe "Matériaux" au laboratoire de Mécanique Physique, un axe de recherche important nous est apparu : l'étude de la fatigue des matériaux.

Ce thème rejoint les préoccupations de bon nombre d'entre nous qui ont reçu une formation d'ingénieur, et de ce fait sont très sensibles aux problèmes de fiabilité des ensembles mécaniques.

Messieurs BRUNET (1) et HARRY (2) ont donc abordé les problèmes de la fatigue des matériaux en s'attachant à relier le phénomène à certaines évolutions de paramètres physiques au cours d'un traitement de fatigue. Pour ma part, je me suis attaché à une étude descriptive du comportement d'un matériau soumis à des sollicitations de torsion alternée. Je rappelerai pour mémoire que nos préoccupations ne sont pas nouvelles, et que depuis bien longtemps les ingénieurs s'étaient rendu compte que la rupture soudaine de pièces mécaniques soumises à des efforts variables et répétés de nombreuses fois, survenait sans que jamais les efforts n'aient dépassé les limites permises par les calculs de résistance des matériaux.

Dès 1829, en Allemagne, on soumet des chaînes destinées aux mines à des épreuves de traction répétées. Mais c'est surtout le développement des chemins de fer qui accentue les efforts de recherches dans ce domaine. C'est en particulier pour déterminer systématiquement les causes de rupture des essieux des véhicules ferroviaires que WOHLER entreprend une série d'essais qui le conduiront entre 1852 et 1869 à jeter les bases d'une théorie de la fatigue des matériaux et à en formuler les lois fondamentales :

"Le fer et l'acier peuvent se rompre sous un effort unitaire inférieur non seulement à la charge de rupture statique, mais aussi à la charge limite élastique lorsque l'effort est répété un nombre suffisant de fois".

"La rupture n'a pas lieu quel que soit le nombre de sollicitations, si "l'écart extrême", entre l'effort maximal et l'effort minimal, est inférieur à une certaine valeur limite".

"Cette valeur limite a été appelée par WOHLER résistance en service ; par TRESCA : charge naturelle de de rupture ; par BAUSCHINGER : limite élastique naturelle".

Ce très bref historique des recherches sur la fatigue peut être complété en consultant l'ouvrage de CAZAUX "la fatigue des métaux", cité en référence bibliographique, qui consacre un chapitre à ce sujet (3).

NOTATIONS

Les notations employées dans le chapitre premier sont indiquées entre parenthèses, si elles diffèrent de celles employées dans le reste de l'étude. J'ai en effet conservé dans ce chapitre les notations usuelles, ou celles particulières de chaque auteur.

R_e	limite élastique en traction (σ_e)
R_r	limite de rupture en traction (σ_r)
E	module d'YOUNG
T_e	limite élastique en torsion (τ_e)
G	module de COULOMB
S	sollicitation alternée en fatigue (σ)
S_D	limite d'endurance (σ_D)
$\bar{S}$	valeur moyenne de la distribution
n	nombre de cycles appliqués
N	endurance
p	proportion de ruptures ou probabilité de ruptures
σ	écart type d'une distribution
s	estimation de σ
γ	glissement
C	couple de torsion
β	angle de torsion de l'éprouvette.

INTRODUCTION

Le phénomène de fatigue des matériaux est très complexe et ses causes physiques sont mal déterminées.

Cependant, si l'on se limite à l'étude des cas où les sollicitations gardent une valeur maximale constante, les diagrammes de WOHLER pour des sollicitations alternées, et ceux de GOODMAN lorsque la valeur moyenne de la sollicitation n'est pas nulle, sont des moyens suffisants pour prévoir le comportement des pièces. Il n'en est pas de même dans le cas de sollicitations complexes, ce qui correspond le plus souvent à la réalité pour les pièces des machines.

Pour rendre compte du comportement du matériau sous un traitement complexe, il faut tenir compte de son histoire de sollicitation. On admet généralement que l'endommagement, ou l'état d'un matériau, est lié à la sollicitation ou au nombre de cycles par une fonction monotone ; l'inconvénient est que l'on ne peut pas juger l'état d'un matériau à un instant donné de son histoire, puisque cet état ne peut être défini de façon logique qu'en fonction des capacités résiduelles de résistance du matériau. Il ne nous reste donc que la possibilité de constater a postériori les effets d'un traitement.

Si l'on désigne par (S_i,n_i) un traitement au niveau S_i pendant n_i cycles, toute épreuve d'endommagement pourra être définie par :

$$\sum_{i=1}^{n} (S_i,n_i) \quad \text{(ou par } S = f(n) \text{).}$$

L'état du matériau à l'issue d'une telle épreuve n'est pas forcément défini par les seules valeurs de S_i et n_i. On peut envisager en effet que l'ordre dans lequel se sont succédées les épreuves partielles (S_i,n_i) intervient dans l'endommagement. En particulier si on inverse l'ordre c'est-à-dire si l'on applique

$$\sum_{i=n}^{i=1} (S_i,n_i)$$

on n'atteindra pas nécéssairement le même état de fatigue pour

Parmi tous les essais complexes l'essai à deux niveaux est un cas particulier intéressant, surtout si les deux sollicitations S_o et S_1 sont situées de part et d'autre de S_D, limite d'endurance.

L'essai $(S_o,n_o) + (S_1,n_1)$ présente une particularité que certains auteurs ont noté : (S_o,n_o) provoque dans certains cas une amélioration du comportement du matériau, connue sous le nom de "effet de sous charge" ou "understressing".

L'étude de ce phénomène est intéressante, dans la mesure où les théories mathématiques du dommage, qui visent à représenter l'état d'un matériau ayant subi un traitement de fatigue par un ou plusieurs paramètres, ne rendent pas compte de cet effet de sous charge. Les divers auteurs ne sont d'ailleurs pas unanimes, ni au sujet de son existence, ni sur la façon de le définir.

Je me propose donc dans cette étude de comparer les thèses en présence, puis, ayant défini une méthode de travail, de la tester sur un matériau.

Après un premier chapitre consacré à des rappels indispensables sur la fatigue des matériaux, je consacrerai le chapitre deux aux études de l'effet de sous charge, en particulier les études descriptives ; dans ce même chapitre, une part importante sera faite à la notion d'équivalence de deux traitements, dans la mesure où une représentation complète du dommage nécessite l'introduction de cette notion.

Le troisième chapitre sera consacré à la mise au point d'une méthode d'essai pour étudier l'effet de sous charge, et l'influence des paramètres tels que S et n sur cet effet. Les résultats expérimentaux et leur interprétation constitueront une partie essentielle de ce chapitre.

En conclusion je définirai l'étape ultérieure de ces travaux sur l'effet de sous charge et ses implications vis-à-vis d'une théorie du dommage.

CHAPITRE PREMIER

RAPPELS SUR LA FATIGUE DES METAUX.

Avant de commencer ce chapitre, je tiens à indiquer que si certains aspects du phénomène sont omis ou très peu développés, cela tient au fait que mon but n'est que de rappeler les définitions et connaissances nécessaires à la compréhension de cette étude.

I - GENERALITES SUR LA FATIGUE DES MATERIAUX.

On peut caractériser la fatigue d'un matériau par la rupture qui survient lorsqu'il est soumis à des sollicitations variables et répétées, la valeur maximale de ces sollicitations étant inférieure à la limite de rupture, voire la limite élastique.

Dès le début des études faites sur la fatigue, les différents auteurs ont été tentés de trouver une loi de comportement des matériaux. L'idée de WOHLER fut de représenter sur un diagramme la contrainte en fonction du nombre de cycles pendant lesquels on devait l'appliquer pour entraîner la rupture. L'allure que prend la "courbe de WOHLER" nous permet de distinguer deux catégories de matériaux : ceux qui possèdent une limite d'endurance et ceux qui n'en possèdent pas.

I - 1. Etude de la courbe de WOHLER et définitions.

Une caractéristique importante des essais de rupture par fatigue est la très grande dispersion des résultats. Je reparlerai ultérieurement de ce phénomène, mais il faut considérer dès à présent que le tracé d'une courbe de WOHLER demande un très grand nombre d'essais ainsi que beaucoup de soin et de rigueur dans l'expérimentation.

Pour tracer le diagramme, on porte les contraintes en ordonnées et le nombre de cycles en abscisses logarithmiques. Généralement, on peut définir trois zones sur la courbe (fig. 1-1) :

- Une partie pratiquement horizontale que l'on appelle zone d'endurance, et où l'on constate à la fois des ruptures et des non ruptures (partie C D sur la fig. 1-1).

- Une portion oblique où il y a toujours rupture, on peut connaître le nombre de cycles entraînant la rupture en fonction de la contrainte ou l'inverse, c'est la zone dite d'endurance limitée (partie B C).

- une zone de contraintes élevées où apparaît une déformation plastique : c'est le domaine de la fatigue oligocyclique (partie A B).

I - 1.1. : Limite d'endurance (σ_D).

ou limite de fatigue ; (l'emploi du premier terme étant préférable). C'est la limite supérieure de l'amplitude de la contrainte périodique qui peut être appliquée indéfiniment sans provoquer la rupture.

Cette limite théorique présente peu d'intérêt pratique, tous les mécanismes ayant une vie limitée.

On définit donc une limite d'endurance conventionnelle : C'est la limite supérieure de l'amplitude de la contrainte périodique qui peut être appliquée pendant un nombre conventionnel de cycles sans conduire à la rupture. (Ou conduisant à une proportion p de ruptures dans le cas d'un traitement statistique des résultats).

Le nombre conventionnel de cycles devrait être choisi en fonction de l'usage auquel on destine le matériau, et en fonction de sa nature. Toutefois, sauf cas d'emplois particuliers, on le choisit de manière à se trouver au delà du point anguleux de la courbe de WOHLER, soit dans la zone d'endurance.

On choisit en général 10^7 à 3×10^7 cycles pour les aciers (fig. 1-1) . Pour les alliages légers, le point anguleux ainsi que l'asymptote horizontale sont généralement moins nets que pour les aciers . (On admet souvent qu'ils n'ont pas de limite d'endurance théorique) (fig. 1-2) et le nombre de cycles choisi est 10^8 ou 5×10^8.

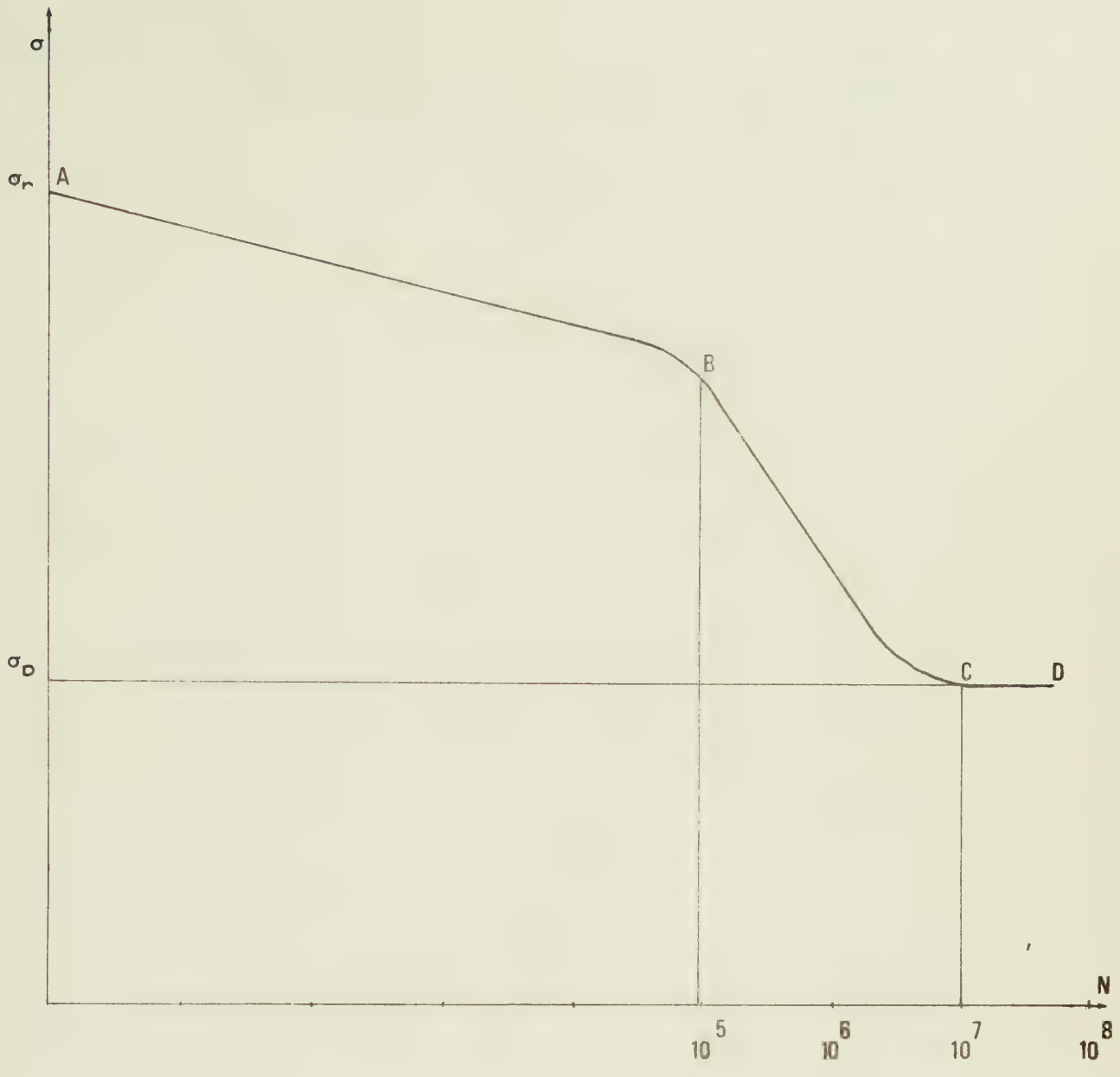
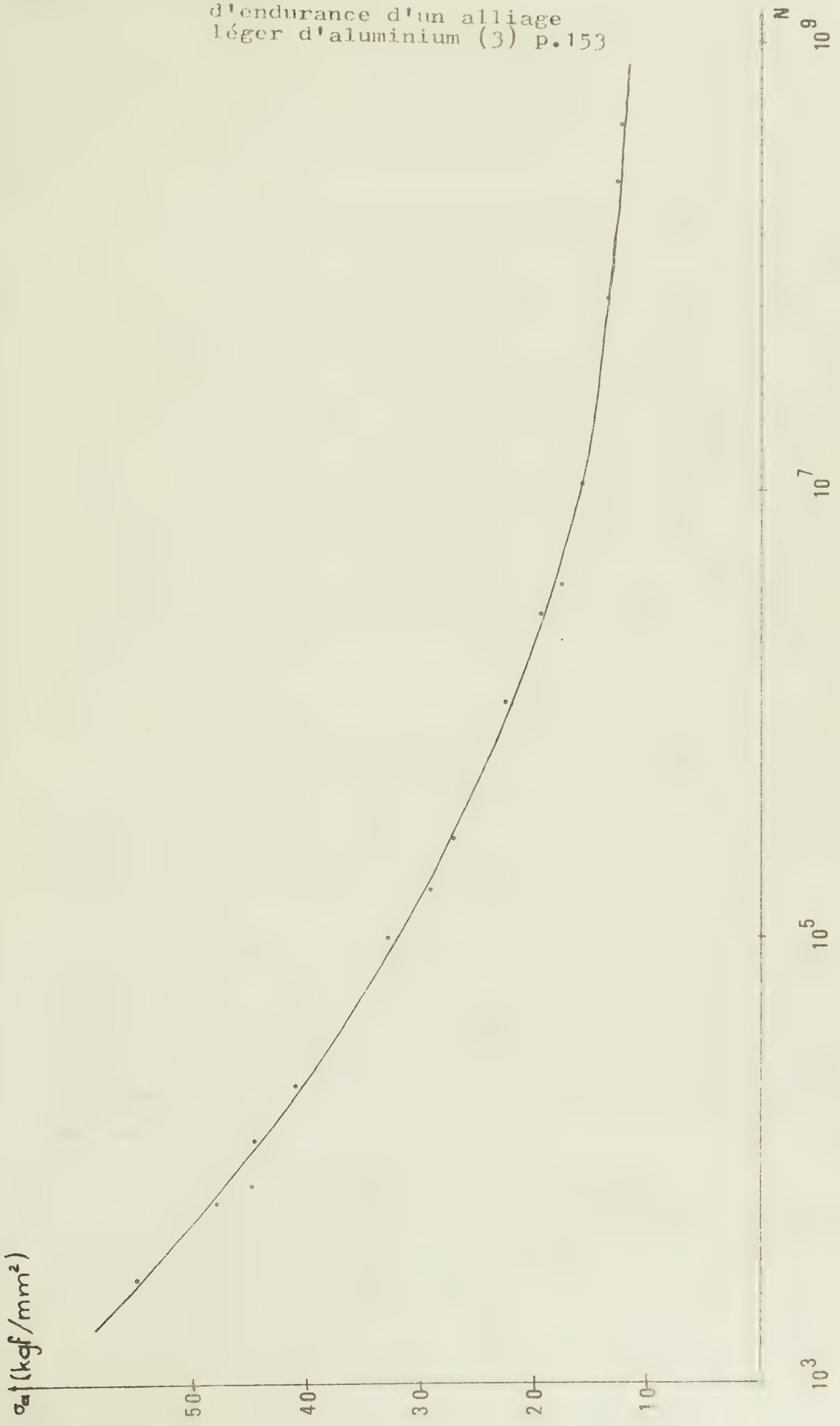


Figure 1-1 : Représentation schématique de la courbe de WOHLER dans le cas d'un acier.

Figure 1-2 : Allure de la courbe d'endurance d'un alliage léger d'aluminium (3) p.153



I - 1.2. : Durée de vie.

C'est le temps pendant lequel une pièce ou une machine doit fonctionner normalement. On l'exprime en heures. Cependant on utilisera abusivement cette terminologie pour désigner l'endurance qui est le nombre de cycles N entraînant la rupture.

I - 1.3. : Fatigue oligocyclique - (fig. 1-3).

Pour les faibles nombres de cycles, ($N < 10^5$), le passage à la rupture statique se fait progressivement. Le prolongement de la [illegible] correspond à la charge de rupture statique. Dans cette zone apparaît une déformation plastique importante. Sur la figure 1-3 on remarque le changement d'allure de la courbe qui laisse présager une modification du comportement du matériau. Il s'agit là d'un domaine assez particulier pour lequel on préfère une représentation différente de celle donnée par la courbe de WOHLER : on représentera la déformation maximale ou même la composante plastique de la déformation en fonction du nombre de cycles (4).

I - 2. Les sollicitations dans les essais de fatigue.

Les essais de fatigue, pour traduire le plus fidèlement possible la réalité, peuvent faire appel à des sollicitations très complexes telles que dans les essais sous amplitudes variables ou avec des programmes de charges.

Je me contenterai de définir ici un certain nombre d'essais sous amplitude maximale constante. Ces essais correspondent le plus souvent à une variation sinusoïdale de la charge. Que l'on soit en traction-compression, torsion, ou flexion, on distingue des sollicitations alternées, répétées ou ondulées en fonction du temps.

I - 2.1. : Sollicitations alternées.

La contrainte change de sens alternativement par exemple traction-compression.

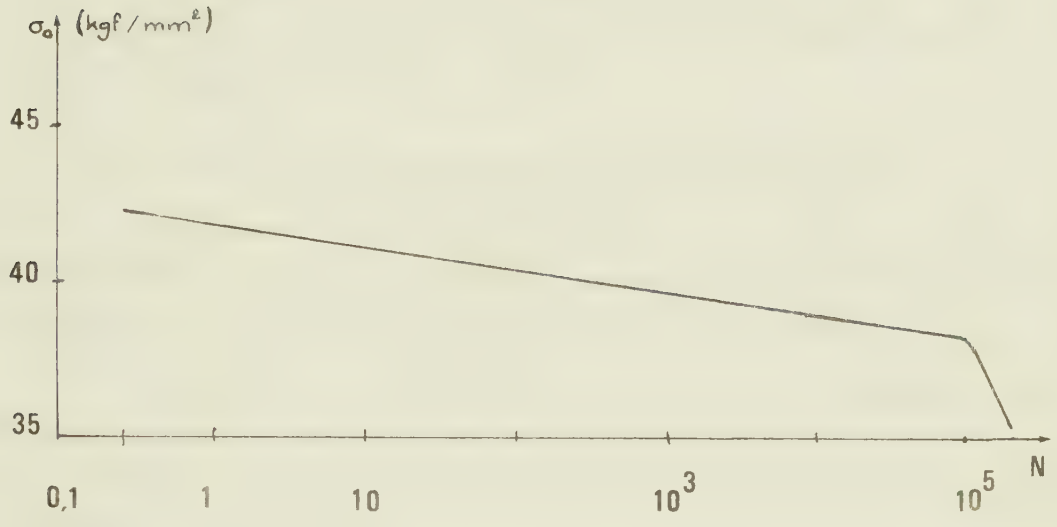


Figure 1-3 : Domaine de la fatigue oligocyclique - Cas d'un acier doux.

Un cas particulier important est celui où la valeur moyenne est nulle : alors les valeurs extrêmes sont $+\sigma$ et $-\sigma$. On dit dans ce cas que l'on a une sollicitation alternée pure ou symétrique.

I - 2.2. : Sollicitations répétées.

Dans ce cas, les efforts conservent le même sens et varient de σ à $+\sigma$ ou de σ à $-\sigma$, la valeur moyenne est $+\sigma/2$ et $-\sigma/2$.

I - 2.3. : Représentations des résultats.

Quelle que soit sa forme, on peut toujours considérer qu'une sollicitation est la somme d'un effort statique constant σ_m et d'un effort alterné d'amplitude σ_a.

Si on peut toujours utiliser le diagramme de WOHLER dans le cas où les sollicitations sont de même nature, on préfère utiliser le diagramme de GOODMAN-SMITH modifié (fig. 1-4).

On porte verticalement de part et d'autre d'une droite à 45° les efforts limites alternés positifs et négatifs, en abscisse les efforts moyens correspondants. On obtient en joignant les points représentatifs un domaine à l'intérieur duquel il n'y a pas rupture. Sur la figure 1-4 on a représenté seulement une partie de ce domaine ; la partie supérieure du diagramme qui correspond à une zone située au delà de la limite élastique a été supprimée.

I - 3. Considérations théoriques sur la fatigue des matériaux.

Les divers diagrammes (WOHLER, GOODMAN, etc...) sont des instruments précieux pour l'ingénieur dans la mesure où ils donnent une représentation du comportement du matériau soumis à la fatigue. Ils sont insuffisants pour expliquer le phénomène.

La rupture par fatigue survient sans que rien apparemment ne la laisse prévoir ; cependant, il semble évident que le matériau subit une transformation au cours

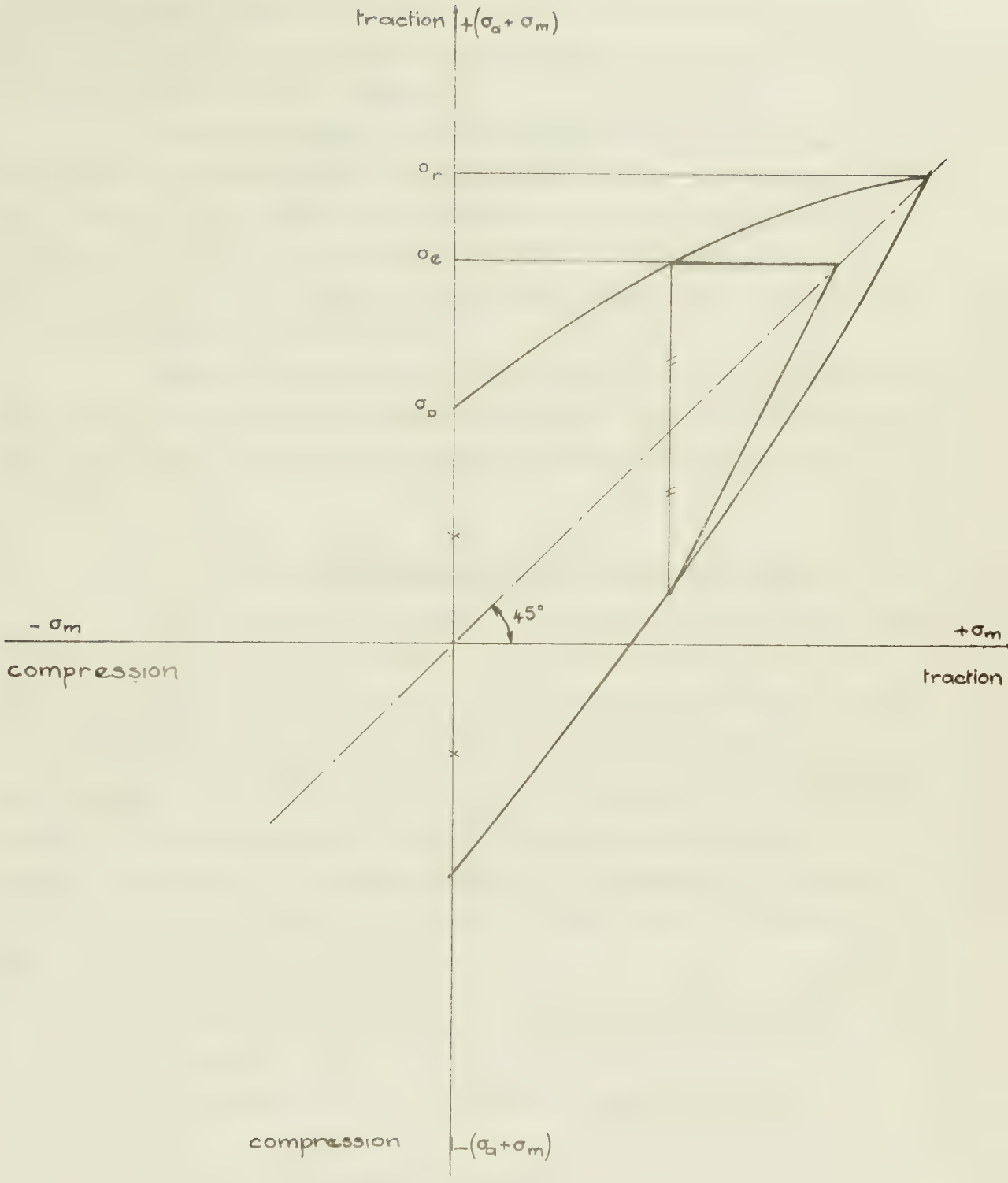


Figure 1-4 : Diagramme de GOODMAN-SMITH.

du traitement. Les chercheurs ont donc été amenés à observer les modifications de certaines propriétés physiques pour tenter d'expliquer la fatigue.

Un grand nombre de recherches ont été faites dans ce sens, dont on ne peut pas dire que toutes ont conduit à une théorie de la fatigue. En effet, de nombreuses grandeurs physiques varient au cours de l'essai de fatigue, mais il est difficile d'affirmer que ces variations sont la cause de l'endommagement du matériau.

Suivant les grandeurs observées, on a coutume de considérer des théories physiques ou des théories mécaniques de la fatigue bien que le terme théorie soit quelquefois impropre.

I - 3.1. : Les théories mécaniques de la fatigue.

En dehors de la remise en cause des trois principes de la résistance des matériaux (homogénéité de la matière, régularité de la distribution des efforts, exactitude de la loi de HOOKE), de la théorie du glissement moléculaire, de la théorie de l'écrouissage, de la théorie de la propagation des fissures, qui ne sont pas toutes vérifiées par l'expérience, l'observation de certains paramètres constitue un apport important à la connaissance du phénomène de fatigue.

Il me semble important de citer ici certains travaux importants dans ce domaine :

- l'étude de la capacité d'amortissement (5) (6) (7),
- l'étude de l'énergie dissipée sous forme de chaleur (6),
- l'étude de la perméabilité magnétique (6).

I - 3.2. : Les théories physiques.

Certaines théories mécaniques attribuent une très grande importance au phénomène de fissuration : vitesse de propagation, concentration de contraintes ou plastification à fond de fissure etc...

Des études assez récentes en métallurgie proposent une explication à la formation des fissures, en particulier des fissures résultant de la fatigue. S'appuyant sur la théorie des dislocations MOTT(8) explique la formation d'extru-

sions et d'intrusions qui seraient à l'origine des fissures.

I - 3.3. : Les théories statistiques.

Il faut ici considérer deux attitudes différentes mais non incompatibles. Face à la dispersion constatée des résultats de fatigue, on est conduit à penser que le phénomène est dispersé par essence. Plutôt que de considérer l'individu, on s'intéresse alors à la population toute entière dont on cherche la loi probabiliste de comportement.

La première étape consiste à remplacer le diagramme de WOHLER par un réseau de courbes d'équiprobabilité de rupture (fig. 1-5). On définit le comportement de la population par la tendance centrale et la dispersion.

Des travaux expérimentaux ont permis de déterminer les lois de distribution des paramètres d'un essai de fatigue.

On doit à M. BASTENAIRE (9) un important travail de clarification dans ce domaine : les distributions de S et de N ne peuvent pas être choisies indépendamment dans la mesure où on peut représenter mathématiquement les courbes d'équiprobabilités (Tableau I).

Tableau I- : Distribution de S et N (BASTENAIRE) (9).

zone de contrainte / éléments observés	zone d'endurance	contraintes intermédiaires	contraintes élevées
distribution de N	$\frac{1}{N}$ normales censurées	forme intermédiaire	Log N normale
courbes d'équiprobabilité (forme locale)	$\frac{1}{N}$ est fonction linéaire de $S - \sigma_D$	$S - \sigma_D = A(N+B)^{-c}$ valable localement	Log N est fonction linéaire de S
Distribution de S	Normales	Normales	Normales

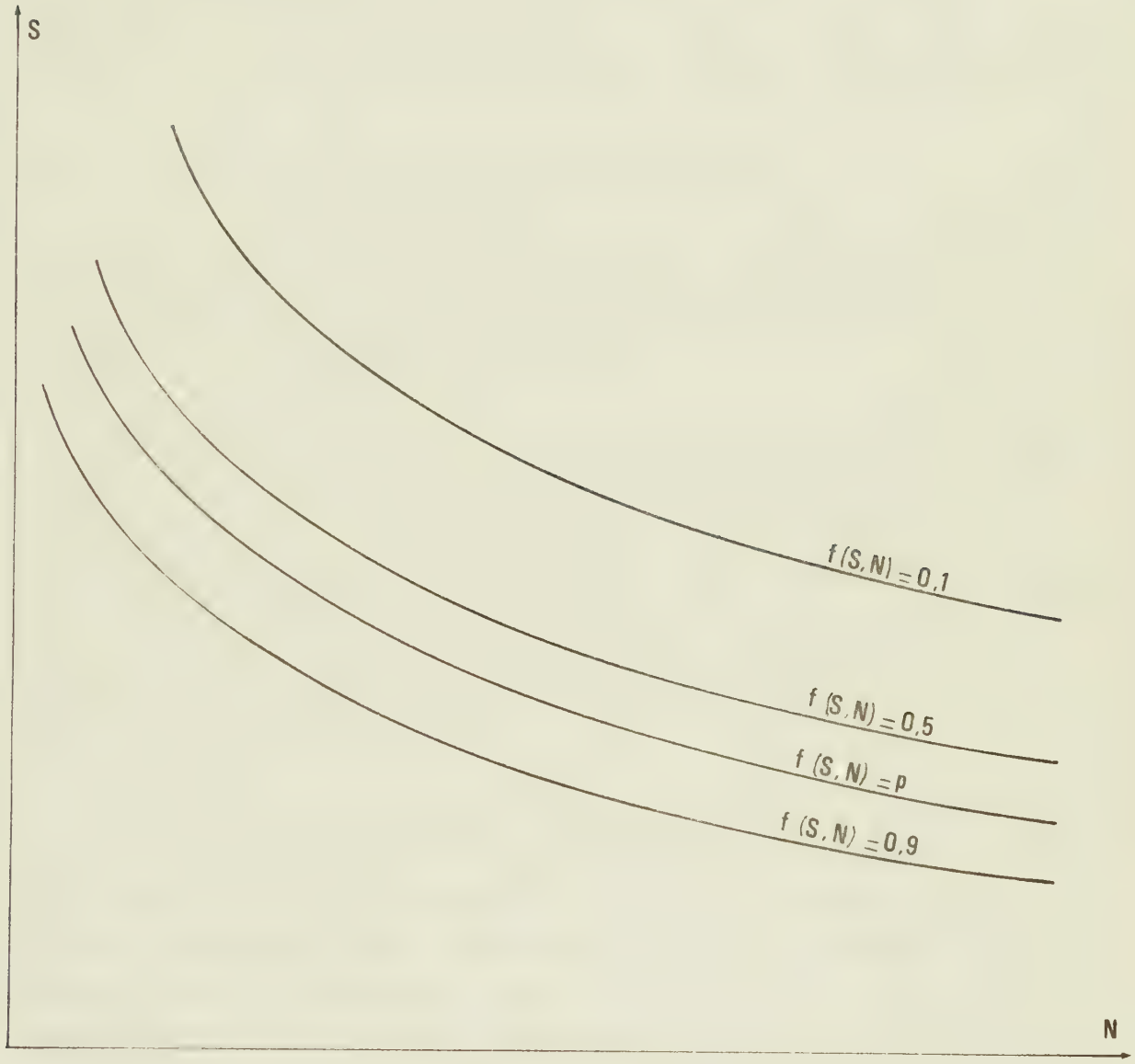


Figure 1-5 : Courbes d'équiprobabilité de ruptures.

Certains auteurs ont considéré que l'extension d'une fissure était causée par des évènements aléatoires (10). Ces auteurs, à partir de raisonnements mathématiques, tendent à prévoir la forme du diagramme de WOHLER. Ces théories statistiques admettent l'hétérogénéité du matériau comme cause de la dispersion. Les travaux de WEIBULL (11) conduiront FREUDENTHAL et GUMBEL (10) (12) à formuler la théorie du "lien le plus faible". Cette dernière théorie contient un certain nombre d'incompatibilités mathématiques (9).

I - 3.4. : Les théories du dommage.

Ce terme fait partie de la terminologie propre à la fatigue des matériaux. Il faut donc bien préciser de quoi l'on parle lorsqu'on emploie ce mot, faute de quoi on risque des confusions regrettables.

On peut donner à ce terme deux acceptions. Dans un cas il traduit un aspect physique très intuitif du phénomène de fatigue : la rupture par fatigue survient sans modification apparente du matériau, cependant, l'évolution de certaines propriétés physiques à des instants particuliers du traitement traduisent bien les modifications de la matière et constituent des indicateurs possibles de son état de dégradation.

Dans le deuxième cas, on désigne des représentations quantitatives de l'endurance des matériaux soumis à des histoires de contraintes variées. Il s'agit là d'un aspect descriptif qui constitue un domaine d'étude intéressant pour l'ingénieur dans la mesure où il peut conduire au calcul des pièces dont on sait représenter, éventuellement de manière approchée, le cycle de contraintes.

Il me parait important de rappeler ici les résultats de MINER (13) et ceux de HENRY (14) qui, bien que peu précis, sont d'un emploi très usuel en raison de la simplicité des calculs qu'ils permettent.

MINER énonce l'hypothèse suivante :

L'application de n_i cycles à la contrainte S_i pour laquelle la durée de vie est N_i entraine un accroissement du dommage égal à n_i/N_i . La rupture survient

quand $n_i/N_i = 1$ (hypothèse de linéarité).

On peut ainsi calculer l'endurance restante d'un matériau à un niveau S_2 après un traitement $(S_1 ; n_1)$:

$$\frac{n_2}{N_2} = 1 - z \qquad \text{avec} \qquad z = n_1/N_1$$

HENRY exprime le dommage pour un niveau de contrainte S par la relation :

$$D = \frac{n}{N} \quad 1 + \alpha \left(1 - \frac{n}{N}\right)$$

$$\text{avec :} \quad \alpha = \sigma_D(S - \sigma_D)$$

Le coefficient c permet de faire intervenir la vitesse d'endommagement d'autant plus élevée que S est grand devant σ_D.

D'autres expressions du dommage cernent la réalité de plus près mais sont d'un emploi difficile ; un effort reste à accomplir dans ce domaine.

CHAPITRE DEUXIEME

ETUDE CRITIQUE DE L'EFFET DE SOUS CHARGE.

II - 1. Généralités sur l'effet de sous charge.

J'ai indiqué dans l'introduction que certains traitements complexes ou simples faisaient apparaître un comportement particulier appelé effet de sous charge.

Cet effet peut être défini comme une élévation de la limite d'endurance d'un matériau qui a été soumis à un certain nombre de cycles sous une contrainte inférieure à la valeur de sa limite d'endurance originelle.

Cet effet constaté par certains auteurs est contesté par d'autres. Il paraît difficile de trancher le débat, car il ne faut pas perdre de vue que le comportement des matériaux n'est jamais rigoureusement identique tant en fonction de leur nature, que du type de l'essai auquel ils sont soumis. A titre d'exemple, des essais faits à l'IRSID par MM. BASTENAIRE et WEISZ (15) sur un acier 35 CD 4 ont conduit ces deux auteurs à conclure à l'existence de l'effet de sous charge : pour cela ils ont comparé les résultats de deux types d'essais : l'un fait suivant une méthode des probits, l'autre suivant une méthode de charge progressive (PROT).

Des essais faits dans des conditions semblables par M. STULEN (16) sur un acier SAE 4330 conduisent cet auteur à une conclusion opposée. On peut remarquer cependant que ces aciers sont très voisins.

Composition des aciers 35 CD 4 et SAE 4330.

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
SAE 4330	0,38-0,43	0,65-0,85	0,2-0,35	0,7-0,9	1,65-2	0,2-0,3
35 CD 4	0,3-0,39	0,6-0,9	0,4	0,8-1,2		0,15-0,30

Il est donc nécessaire, dans ce domaine, d'être très prudent et d'éviter toute généralisation hâtive. Toutefois, constatant que l'effet de sous charge est susceptible d'exister

dans certains cas, il me semble intéressant de faire une étude critique de certains résultats. On doit à M. BASTENAIRE des travaux importants sur ce sujet. Il y sera fait souvent référence dans les paragraphes qui vont suivre (15) (17).

II - 2. Interprétation physique de l'effet de sous charge.

Il semble admis actuellement que la cause de l'effet de sous charge serait la disparition des pointes de contrainte par déformation plastique et écrouissage, permettant au matériau de subir ultérieurement une contrainte plus élevée. Cette explication est corollaire des théories de l'écrouissage.

Cet aspect de l'effet de sous charge ne rentre pas dans le cadre de mon étude, et si j'ai effectué certains essais statiques sur des éprouvettes après traitement de sous charge, les résultats que j'ai obtenus dans ce domaine ne sont absolument pas significatifs d'un quelconque écrouissage, sans pourtant que je puisse tirer une quelconque conclusion.

II - 3. Etudes descriptives de l'effet de sous charge.

Dans ce type d'études, les divers auteurs ne cherchent pas à donner une explication physique du comportement des matériaux, leur seule ambition est de constater les effets de l'understressing et de les caractériser. Il est alors nécessaire de faire appel aux méthodes statistiques. Compte tenu de cela, il importe de savoir dans quelles conditions on peut parler d'effet de sous charge et une étude critique des diverses conceptions s'impose.

II - 3.1. : Les méthodes d'analyse d'étude de l'effet de sous charge.

Il semble important de définir clairement la méthode permettant de conclure à la présence d'un effet de sous charge, c'est-à-dire la méthode de comparaison de deux traitements différents appliqués à deux échantillons d'éprouvettes.

II - 3.1.1. Cas où l'on compare les effets d'un même traitement sur deux lots différenciés par un traitement antérieur appliqué à l'un d'eux.

Cette méthode a été employée par divers auteurs. Elle conduit à un certain nombre d'incompatibilités entre des faits d'expérience connus et les conséquences logiques qu'elle implique.

Il ne faut pas confondre cette méthode avec celle qui consiste à comparer les effets sur la population d'origine d'un traitement constitué d'une épreuve de sous charge suivie d'une deuxième épreuve quelconque, aux effets sur cette même population de la deuxième épreuve seulement. Dans ce cas, on compare un traitement complexe à un traitement simple, et on tient compte de toute l'histoire de chaque échantillon. Dans le premier cas on compare les distributions, dans un traitement donné, d'un lot d'éprouvettes vierges et d'un lot d'éprouvettes ayant survécues à un traitement antérieur. Conclure, dans ces conditions, que si les proportions de ruptures sont égales il n'y a pas d'effet de sous charge, conduit à admettre une forme exponentielle pour la distribution des probabilités de non ruptures (17). Ce fait n'est pas confirmé par l'expérience.

On peut faire une autre remarque au sujet de cette méthode (15). Si on définit la durée de vie résiduelle des éprouvettes non rompues par la médiane de ces durées de vie, on doit admettre que la durée de vie initiale d'un échantillon, elle aussi définie par la médiane, n'est pas égale à la somme de la durée de ce traitement et de la durée de vie résiduelle après ce traitement.

On voit tout de suite que des auteurs qui se sont appuyés sur des méthodes semblables pour décrire l'effet de sous charge ont pu arriver à des conclusions pour le moins discutables.

En particulier, MM. EPREMIAN et MEHL (18) ont effectué des essais à deux niveaux et ont comparé le comportement des éprouvettes non rompues du fait du premier niveau à un lot d'éprouvettes vierges dans le traitement au deuxième niveau. Leur propos était de montrer que l'effet de sous charge n'existe pas : si les durées de vie d'éprouvettes, ayant subi le niveau S_1, sont plus longues, dans l'essai sous S_2, que les durées de vie d'éprouvettes vierges, cela tient d'une part à la dispersion des résultats, et, d'autre part, au fait que l'essai sous S_1 a opéré une sélection des éprouvettes.

Un certain nombre de critiques peuvent être apportées à leur travaux, sans pouvoir décider a priori si l'effet de sous charge existe ou non.

Je pense que le programme d'essais établi par ces deux auteurs ne convient pas à une étude sur l'effet de sous charge, et que l'interprétation qu'ils font de leurs résultats est douteuse. Les trois niveaux de contraintes choisis, susceptibles de provoquer cet effet, sont respectivement $S_D-\sigma$, S_D, $S_D+\sigma$. La durée de l'essai est $2,5\ 10^7$ cycles; il faut rappeler que S_D représente la limite d'endurance à 50% de ruptures et que σ représente l'écart type dans la zone d'endurance. On peut donc prévoir, compte tenu du caractère normal de la distribution des contraintes dans la zone d'endurance, que les proportions de ruptures sous ces trois contraintes seront 16%, 50%, 84%.

Il paraît difficile de parler dans ce cas de traitement produisant un effet de sous charge sur la population, dans la mesure ou ce traitement a, dans deux cas sur trois, pour effet de détruire plus de 50% de la population.

EPREMIAN et MEHL lèvent cette difficulté en considérant qu'il ne faut pas comparer dans un traitement ultérieur la totalité d'un échantillon d'éprouvettes vierges aux quelques unes ayant supporté avec succès le traitement

de sous charge. Ils comparent ces dernières avec une proportion identique à celles ayant la durée de vie la plus longue dans le traitement de comparaison. Cela revient à considérer que le premier traitement opère une sélection de la proportion P des éprouvettes les plus résistantes et que l'on compare celles-ci dans un nouveau traitement à la proportion p d'éprouvettes vierges qui auront la meilleure résistance dans ce même traitement ; il est alors normal dans ce cas que les durées de vie moyennes des deux lots ainsi définis soient comparables.

En affirmant cela, MM. EPREMIAN et MEHL nient l'effet que peut avoir eu le prétraitement sur les éprouvettes non rompues de son fait : ce qui revient à considérer que toute éprouvette non rompue au cours d'un traitement de fatigue se trouve dans un état vierge, ce qui est une absurdité, et peut conduire, ainsi que le dit M. BASTENAIRE (17), à "la possibilité de faire survivre une proportion arbitraire d'éprouvettes à des essais de durée indéfinis pratiqués à une contrainte arbitraire".

Les diverses études présentées jusqu'ici ne doivent pas conduire à la conclusion qu'il est impossible d'étudier correctement l'effet de sous charge par des méthodes directes faisant appel à des essais, soit sous charges constantes, soit sous charge progressive.

II - 3.1.2. Etude de l'effet de sous charge à l'aide d'essais sous charge progressive.

Dans ce type d'essais, on compare directement les valeurs des contraintes provoquant 50% de ruptures d'une part dans un essai à niveaux constants, et, d'autre part, dans un essai sous charge progressive. Les paramètres charge initiale et vitesse de chargement sont très importants quant à l'apparition de l'effet de sous charge.

Des travaux, effectués à l'IRSID par MM. BASTENAIRE et WEISZ, sont une illustration de cette méthode (15). On constate bien que lorsque l'effet de sous charge apparaît (cas de l'acier 35 CD 4 par exemple), la limite d'endurance constitue bien une réalité physique que l'on peut définir comme un seuil en dessous duquel une précharge peut provoquer l'effet de sous charge et au dessus duquel cet effet ne peut pas apparaitre (9) p. 52.

Une autre illustration de cette méthode est dûe à STULEN (16), qui par contre constate, sur l'acier SAE 4330, l'absence d'un effet de sous charge.

MM. FERRO et ROSSETTI (19) ont pour leur part tracé la courbe de WOHLER par une méthode de charge constante et une méthode de charge progressive. Ils ont remarqué la présence d'un phénomène de sous charge d'autant plus important que la charge progressait plus lentement et que la valeur de la contrainte initiale était plus proche, par valeur inférieure de la limite d'endurance du matériau, sans que cette dernière influence soit très significative.

II - 3.2. : Méthode indirecte d'étude de l'effet de sous-charge.

Si on considère les difficultés expérimentales et d'interprétation des résultats dans les méthodes directes d'étude de l'effet de sous charge, on peut tenter de donner une représentation mathématique de l'histoire de contrainte d'un matériau.

Cela conduit à construire une théorie du dommage qui permettrait de caractériser à chaque instant l'état du matériau.

J'ai déjà indiqué les insuffisances des théories classiques du dommage et, en particulier, leur incapacité à rendre compte du phénomène d'understressing. Il semble intéressant, avant de bâtir une théorie du dommage, de définir correctement l'état d'un matériau et d'établir les conditions d'équivalence de deux traitements.

II - 3.2.1. Définition de traitements équivalents.

Cette notion est définie par NEWMARK (20) de la manière suivante :

$(S_1 n_1)$ équivalent à (S_o, n_o)

noté $(S_1, n_o) \longrightarrow (S_o, n_o)$

si la durée de vie résiduelle sous S_o des éprouvettes ayant subi $(S_1\ n_1)$ est égale à la durée de vie résiduelle sous S_o des éprouvettes ayant subi (S_o, n_o), c'est-à-dire $(N_o - n_o)$ si N_o est la durée de vie totale sous S_o.

Cette relation d'équivalence complétée par la notion d'équivalence réciproque et par celle de transitivité qui peuvent s'écrire :

réciprocité $\begin{cases} (S_1\ n_o) \longrightarrow (S_o, n_o) \text{ et } (S_o, n_o) \longrightarrow (S_1, n_1) \\ \text{soit} \qquad (S_1\ n_1) \rightleftarrows (S_o, n_o) \end{cases}$

transitivité $\left.\begin{cases} (S_1\ n_1) \rightleftarrows (S_o, n_o) \\ (S_2\ n_2) \rightleftarrows (S_o, n_o) \end{cases}\right\} \Longrightarrow (S_1, n_1) \rightleftarrows (S_2, n_2)$

peut servir à l'établissement d'une théorie du dommage.

II - 3.2.2. Bases d'une théorie du dommage défini par un paramètre (17).

En s'appuyant sur la notion d'équivalence définie au paragraphe précédent, il est possible d'établir une théorie du dommage défini par un paramètre, à condition d'émettre d'autres hypothèses, pour que cette théorie soit utilisable.

II - 3.2.2.1. - Hypothèses du dommage à un paramètre :

Hypothèse 1 : Tout traitement complexe défini par $S = f(n)$ possède au moins un équivalent à contrainte constante.

Hypothèse 2 : Deux traitements équivalents suivis de deux traitements identiques quelconques donnent des résultats finaux équivalents.

Hypothèse 3 : Soit δ le dommage à un instant quelconque d'un parcours $S = f(n)$ on peut définir :

$$d\delta = A(\delta, S)\, dn + B(\delta, S)\, dS$$

De l'hypothèse 3, et compte tenu du fait de la définition d'un traitement de fatigue, toute variation de contrainte qui se fait sans variation du nombre de cycles, n'entraîne aucun endommagement, donc :

$$B(\delta_1, S) \equiv 0$$

II - 3.2.2.2. - Conception probabiliste du dommage défini par un paramètre :

Les hypothèses précédentes peuvent se transformer facilement pour donner lieu à la conception probabiliste du dommage, beaucoup mieux adaptée a priori pour décrire un phénomène aussi dispersé que la fatigue.

Pour cela, il suffit, dans la définition de l'équivalence, de remplacer durée de vie d'une éprouvette par distribution des durées de vie de la population (ou de l'échantillon). Cependant, l'équivalence de deux traitements implique l'identité des distributions des éprouvettes restantes au cours d'un nouvel essai, ce qui oblige à déduire l'identité du passé de plusieurs échantillons en comparant leurs futurs, ce qui pose de sérieux problèmes expérimentaux. On peut cependant remarquer qu'exiger l'identité des distributions dans un traitement futur implique l'identité des distributions dans les traitements passés. Comme on peut choisir l'un quelconque des paramètres définissant l'état des populations, et que tous sont liés, le choix de la proportion de ruptures semble très indiqué. Deux traitements équivalents, donc qui ont produit le même dommage, seront donc caractérisés par une proportion identique de ruptures.

"Ainsi, chaque fois que deux essais quelconques produiront des proportions égales de ruptures on pourra en déduire que les populations seront, à la fin de l'essai, dans des états équivalents et que, dans tout nouvel essai, elles se comporteront, (ou ce qu'il en reste) de façon statistiquement identique".

C'est ainsi que s'ennonce la condition nécessaire et suffisante pour représenter le dommage par la probabilité de ruptures (17).

II - 3.2.3. L'effet de sous charge et la théorie du dommage à un paramètre.

Un certain nombre de remarques peuvent être faites au sujet de la théorie ébauchée ci-dessus, particulièrement en ce qui concerne la représentation du dommage par la proportion de ruptures. Cette représentation implique de considérer l'identité des proportions de ruptures comme nécessaire et suffisante pour décrire l'équivalence de deux traitements. Cette condition n'est pas toujours confirmée par l'expérience, et on montre que pour qu'elle soit vérifiée, il faut supposer l'identité des distributions des durées de vie résiduelles, en particulier, l'égalité des dispersions ce qui n'est généralement pas le cas (21).

On peut de toutes façons difficilement concevoir qu'une telle théorie rende compte de l'effet de sous charge. On peut même prouver qu'un matériau qui serait soumis à cette loi de dommage est insensible à l'effet de sous charge, ce que montrent bien des essais effectués par STULEN (16) sur l'acier SAE 4330.

On peut montrer d'une autre manière que cette théorie est en contradiction avec l'existence de l'effet de sous charge.

Considérons (fig. 2-1) les courbes d'équiprobabilité de ruptures. Si l'essai (S_1,n_1) était équivalent à (S_2,n_2) (en raison de la théorie développée plus haut), dans une épreuve quelconque ultérieure, (recherche de limite d'endurance par exemple) deux échantillons ayant subi respectivement

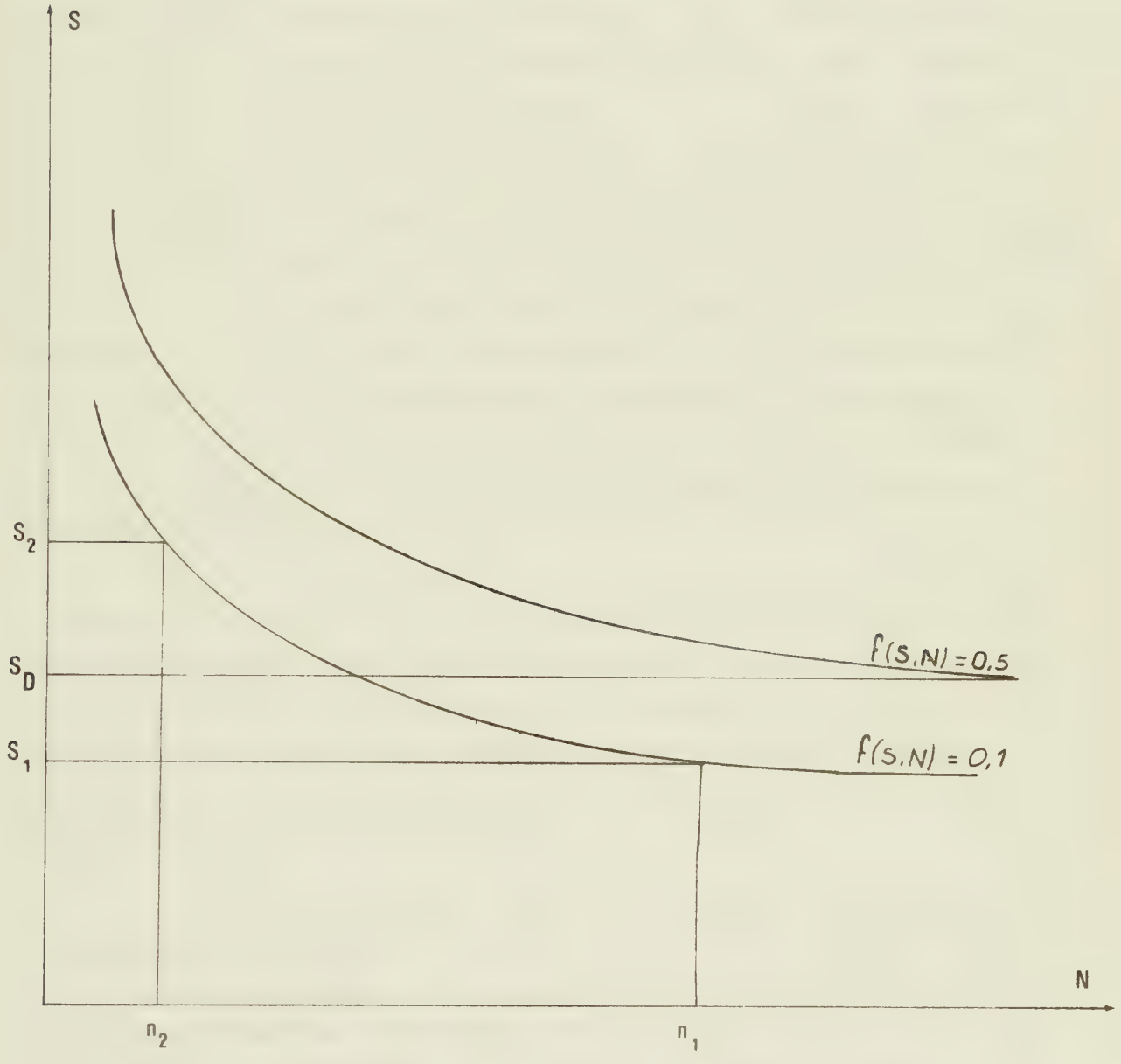


Figure 2-1

(S_1,n_1) et (S_2,n_2) devraient se comporter de manière statistiquement identique ; si l'effet de sous charge existe, on ne conçoit pas qu'il puisse en être ainsi.

On remarquera que la notion d'équivalence n'est pas a priori indispensable pour définir une théorie quelconque du dommage, mais une telle théorie n'aurait aucun intérêt dans la mesure où il ne serait pas possible de considérer qu'un ensemble de traitement conduit au même dommage ; c'est-à-dire qu'il faudrait trouver autant d'états différents qu'il existe de traitements possibles. On comprend qu'il est difficile de concevoir des états équivalents qui correspondraient à des niveaux de contraintes situés de part et d'autre de la limite d'endurance, c'est pourquoi dans un rapport de l'IRSID (21), on peut lire "Dans le modèle du dommage à un paramètre, (...) si tout endommagement (S_1,N_1) possède sous toute contrainte S_2 supérieure à la limite d'endurance, un équivalent (S_2,N_2)"... ou encore "Ainsi tout endommagement (S,N) possède sous une contrainte S' (non inférieure à la limite d'endurance) un équivalent (S',N') et un seul".

Je ne pense pas que l'on puisse rejeter toute idée d'équivalence, si l'on veut considérer des traitements ayant lieu pour tous niveaux possibles de contrainte. Il faut toutefois considérer que la limite d'endurance peut constituer une frontière entre deux domaines tels qu'aucun couple (S_1,n_1) de l'un ne puisse posséder d'équivalent dans l'autre (dans le cas d'understressing en particulier).

Compte tenu de ce fait il ne paraît pas impossible de parler de dommage même défini par un seul paramètre dans le cas où il y aurait effet de sous charge, à condition toutefois de ne pas considérer que la proportion de ruptures puisse être ce paramètre. On peut remarquer au sujet de ce dernier point que les essais effectués sous l'égide de la Société Française de Métallurgie ont montré que pour pouvoir définir le dommage par la proportion de rupturesil faut admettre l'identité des distributions des durées de vie résiduelles, en particulier l'égalité des dispersions.

II - 4. Conclusions et schéma possible d'un dommage rendant compte de l'effet de sous charge.

L'effet de sous charge n'a pas fait l'objet de nombreuses études systématiques - il a été constaté ou enregistré.

Les auteurs qui lui ont consacré une part de leurs recherches n'ont pas défini clairement ce qu'ils entendaient par effet de sous charge ; il s'en suit des méthodes expérimentales pas toujours très bien adaptées.

Actuellement, seule la méthode de la charge progressive semble avoir donné des résultats intéressants et conduit à des interprétations dont on ne peut mettre en doute la rigueur - que l'effet de sous charge se soit manifesté ou non.

Les tentatives de description du comportement d'un matériau sous fatigue par une théorie mathématique du dommage demeurent pratiquement inopérantes pour rendre compte de l'effet de sous charge. On peut schématiser les théories du dommage comme étant la volonté de représenter l'état de résistance résiduel à la fatigue d'un matériau par un nombre réel, c'est-à-dire caractériser par ce nombre l'ensemble des traitements qui conduisent à cet état. Il semble assez logique de convenir d'attribuer le dommage nul au matériau vierge; de même s'il n'y a pas d'effet de sous charge, il paraît évident que le dommage soit une fonction croissante du nombre de cycles pour une valeur donnée de la contrainte, et une fonction croissante de la contrainte pour un nombre de cycles donné. Cela traduit bien le fait que la tendance centrale de la distribution des durées de vie résiduelles sous un traitement quelconque est inférieure pour un échantillon ayant subi (S ,n) à celle d'un échantillon d'éprouvettes vierges et le sera d'autant plus que S et n seront plus grands.

Où la représentation du dommage par un nombre positif ou nul devient problématique, c'est lorsque existe l'effet de sous charge car alors il existe des traitements (S,n) tels que la tendance centrale de la distribution des durées de vie résiduelles dans un traitement quelconque est supérieure pour l'échantillon ayant subi (S,n) à celle d'un échantillon vierge. Il faudrait alors admettre qu'il existe un domaine D de traitements qui produisent un dommage repérable par un nombre négatif.

Il serait intéressant de vérifier si dans ce domaine il existe des traitements différents produisant le même dommage "négatif".

CHAPITRE TROISIEME

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EFFET DE SOUS CHARGE.

III - 1. Objet et but de l'étude.

Compte tenu de ce qui a été vu au chapitre précédent, il me semble intéressant de vérifier sur divers matériaux l'existence ou la non existence de l'effet de sous charge. Il est alors indispensable de définir un type d'essai suffisamment simple, rapide, mais très rigoureux permettant l'étude de ce phénomène.

Je me limiterai dans le cadre de ce travail à mettre au point une méthode d'essai qui permette cette étude. En particulier il est indispensable de déterminer l'influence des paramètres S et n définissant ce que je nommerai abusivement "prétraitement", alors qu'il ne s'agit que d'une phase d'un traitement complexe.

III - 2. Méthodes et moyens d'essai.

Il ne me semble pas possible d'envisager une étude quelconque du comportement des matériaux en fatigue sans faire appel aux méthodes statistiques. Je rappellerai que pour cela on dispose d'un certain nombre de moyens. Toutefois, il faut remarquer que si l'on préfère généralement rechercher la contrainte, qui sous un nombre de cycles donné, produit la proportion p (généralement 50%) de ruptures, il est possible de déterminer la valeur de n qui, sous la contrainte S, conduit à la proportion p de ruptures. Le choix de la première démarche s'explique aisément par le fait que la dispersion des contraintes est plus faible que celle des durées de vie, et que les contraintes de ruptures sont distribuées suivant une loi normale, ce qui n'est pas le cas pour n.

III - 2.1. : Les méthodes statistiques d'essai.

Ces méthodes ont surtout été employées pour déterminer la limite d'endurance, mais il est utile de remarquer qu'elles restent valables pour déterminer la valeur de S conduisant à l'endurance limitée N.

III - 2.1.1. La méthode des probits (22).

Après tirage au sort, on répartit les éprouvettes en quatre ou cinq lots, devant être traités chacun à une contrainte différente ; celles-ci sont espacées régulièrement autour de la valeur présumée de la contrainte cherchée qui est souvent la limite d'endurance.

On note pour chaque niveau les proportions de ruptures qui sont représentées en fonction de la contrainte par une droite, dite droite de HENRY, sur un papier à échelle gaussienne.

On peut déterminer ainsi la contrainte correspondant à 50% de ruptures ou valeur moyenne et l'écart type de la distribution σ : la différence entre les contraintes provoquant 16% et 84% de ruptures est égale à 2 σ. Cette méthode très rigoureuse nécessite un grand nombre d'épreuves (entre une centaine et deux cents). Elle présente l'avantage de permettre la détermination de tout quantile autre que la moyenne.

III - 2.1.2. La méthode en escalier (stair-case) de DIXON et MOOD (23).

On choisit quatre ou cinq niveaux de contrainte, encadrant la valeur S cherchée, régulièrement espacés d'une valeur d voisine de l'écart type σ. On essaie successivement 15 à 30 éprouvettes pendant un nombre donné de cycles en procédant de la manière suivante : on essaie la première éprouvette à l'un des niveaux choisis ; s'il y a rupture avant complétion du nombre de cycles on essaie l'éprouvette suivante au niveau immédiatement inférieur, dans le cas

contraire, au niveau supérieur ; on procède ainsi jusqu'à épuisement des éprouvettes.

La valeur de la moyenne est donnée par l'expression

$$\bar{S} = S_o + d\left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2}\right)$$

S_o est le plus bas niveau de contrainte.

$N = \sum n_i$ le nombre des réponses les moins fréquentes.

$A = \sum i\, n_i$ où i est le rang de chaque niveau

compté de manière croissante depuis la valeur 0 affectée à S_o

le signe - est adopté si l'éventualité la moins fréquente est la rupture.

L'estimation de l'écart type de la distribution est donnée par

$$s = 1.62\, d\, \left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0{,}029\right) \text{ avec}$$

$$B = \sum i^2\, n_i .$$

L'emploi de cette méthode qui ne nécessite que 15 à 30 éprouvettes est simple. Toutefois un certain nombre de remarques s'impose :

- elle n'est applicable que pour des distributions normales
- on ne peut pas déterminer d'autre quantile que la moyenne
- d doit être choisi entre 0,5 σ et 2 σ
- $(NB - A^2)/N^2$ doit être $>$ 0,3 pour estimer σ.

III - 2.1.3. <u>La méthode d'approximations successives ou d'itération de ROBBINS et MONRO (24) (25).</u>

Cette méthode est très rapide, une dizaine d'éprouvettes suffit pour déterminer une limite d'endurance. Son emploi est délicat et demande la connaissance a priori de l'écart type de la distribution.

A partir d'un premier essai fait à une contrainte S_o, voisine de celle que l'on cherche, on applique une formule de récurence pour déterminer le niveau de l'essai suivant. Si m est le rang du dernier essai, l'estimation de la valeur cherchée est donnée par S_{m+1} calculée à l'aide de la formule de récurence déterminant chaque niveau d'essai.

Soit p_r la proportion de ruptures au niveau S_r. Dans le cas où un seul essai est fait à chaque niveau $p_r = 0$ ou 1. On peut écrire :

$$S_{r+1} = S_r + \frac{2,5}{r+1} \sigma (0,5 - p_r).$$

Cette méthode qui permet de déterminer un quantile quelconque de la distribution ne donne aucune indication sur son écart type.

III - 2.2. : <u>Les machines d'essai.</u>

Les machines, ainsi que leurs caractéristiques, font l'objet de l'annexe du présent mémoire. Ce sont des machines de torsion alternée que l'on peut classer dans la catégorie des machines imposant une déformation.

Hormis leur simplicité qui ne suffirait pas à justifier un tel choix, ces machines permettent d'appliquer une sollicitation rigoureusement alternée et parfaitement reproductible. Bien que l'amplitude de la sollicitation soit peu sensible aux variations de la raideur de l'éprouvette, il est nécessaire d'effectuer un étalonnage pour chaque type d'éprouvettes employées.

En toute rigueur, la grandeur mesurable sur de telles machines est la déformation, cependant, pour me conformer à l'usage, les résultats que je donnerai seront définis par la contrainte. Un tel abus de langage est justifié dans la mesure où le module de cisaillement ne varie pas sensiblement en cours d'essai, sauf juste avant la rupture, alors qu'on peut considérer qu'il y a destruction du matériau.

Je disposais pour mes essais de deux machines dont la fréquence de travail est 50 Hz. La contrainte maximale imposable compte tenu du type d'éprouvette est de l'ordre de 200 MPa. Le système de comptage associé aux machines permet la présélection d'un nombre de cycles à l'issue duquel l'essai est interrompu si la rupture n'a pas eu lieu. L'une des deux machines servait essentiellement à la réalisation du prétraitement, la deuxième phase du traitement étant effectuée sur l'autre.

Je dois faire une remarque importante au sujet de l'étalonnage de la machine utilisée pour la deuxième phase du traitement. Le matériel de mesures extensométriques dont je disposais nécessite un étalonnage particulier lorsqu'il est employé pour des mesures dynamiques ; il est difficile dans ce cas de reproduire avec exactitude la relation entre la différence de potentiel délivrée par le pont d'extensométrie et le nombre de microdéformations.

La mesure de G et l'étalonnage de la machine utilisée par M. HARRY ont été faits en même temps, après un réglage soigneux de l'appareillage de mesure. Lors de la mise en route de la deuxième machine, nous nous sommes contentés de reproduire les positions de réglage de cet appareillage sans vérifier que la relation entre le signal électrique et les microdéformations était correcte. Il s'est avéré par la suite qu'une erreur d'environ 5% avait été commise par excès sur δ. En conséquence, les valeurs annoncées pour δ et donc pour S sont toutes majorées de 5% environ, quand elles se rapportent aux essais d'endurance effectués sur cette machine.

III - 3. Etudes préliminaires.

Ces études ont porté sur le choix d'un matériau, la réalisation des éprouvettes, la détermination des caractéristiques statiques du matériau. De plus, compte tenu des essais envisagés, il est apparu souhaitable de déterminer l'ordre de grandeur de certaines caractéristiques de fatigue du matériau : pour cela le tracé d'une courbe de WOHLER s'imposait. De même, la mesure de grandeurs telles que G après un traitement de fatigue est nécessaire en particulier pour continuer à parler de contrainte, alors que la sollicitation imposée est un déplacement.

Je dois signaler que bon nombre de ces essais ont été effectués en commun avec M. HARRY.

III - 3.1. : Choix d'un matériau - éprouvettes.

III - 3.1.1. Le matériau.

La capacité des machines limite forcément le choix des matériaux que l'on peut utiliser. Tout matériau pour lequel le domaine de contraintes possibles au cours d'un essai de fatigue dépasse 200 MPa est à exclure. De plus, au sein du groupe de recherche dont je fais partie, il nous avait semblé souhaitable d'utiliser un même matériau et certains essais avaient été commencés avec l'acier XC 10 f qui est un acier de construction fin, assez employé. Mon choix s'est donc porté sur ce matériau.

Cet acier, fourni sous forme de barres étirées puis recuites, est issu d'une même coulée ; l'analyse métallurgique fournie par le fabricant est indiquée dans le tableau ci-après.

Tableau III - 1

XC 10 f - coulée n° 29 948.

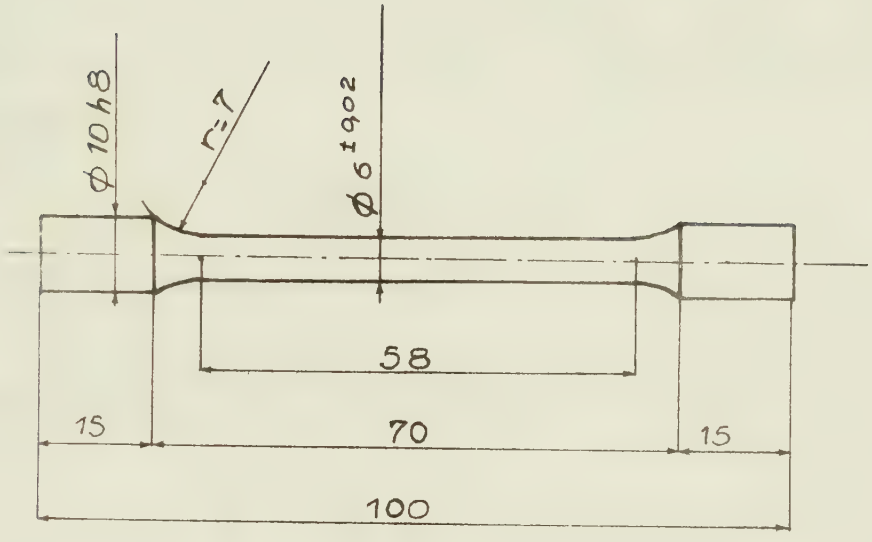
Carbone	Manganèse	Soufre	Phosphore	Silicium
0,07%	0,45%	0,022%	0,010%	0,181%

III - 3.1.2. Les éprouvettes.

Les dimensions et la forme des éprouvettes ont été choisies en fonction d'un certain nombre d'impératifs n'ayant rien à voir avec le type d'essais que j'envisageais. Les essais de M. HARRY demandaient la mise en place sur les éprouvettes d'un environnement de mesures de températures, ce qui a nécessité de choisir des éprouvettes avec une partie cylindrique assez longue.

Cette disposition nous permettait en outre d'effectuer facilement un certain nombre de mesures extensométriques en cours d'essai (facilité de mise en place de jauges). La longueur de la partie cylindrique présentait, dans le cas de mes essais, l'inconvénient de ne pas favoriser une section particulière, ce qui ne semble pas avoir eu d'influence sur les résultats.

Ces éprouvettes dont le dessin est représenté fig. 3-1 ont été réalisées au tour automatique, et employées brut de tournage, ce qui évidemment ne joue pas en faveur d'une diminution de la dispersion des résultats, ni d'une valeur maximale de la limite d'endurance. Toutefois il faut noter que pour un acier doux l'influence de l'état de surface est peu importante sur S_D, et que le fait de l'usinage sur un tour automatique garantit mieux qu'un usinage manuel la similitude des états de surface. Les contrôles de qualité suivants ont été effectués avant d'accepter chaque éprouvette :



300 éprouvettes XC10f

Tour automatique BR20

Figure 3-1 : Eprouvettes.

- Etat de surface sans rayure ni défaut apparent.
- Congés de raccordement réguliers.

En outre, chaque éprouvette a subi un contrôle dimmensionnel strict, avant d'être numérotée, dans l'ordre d'usinage ; chaque lot constitué par les éprouvettes issues d'une même barre a été repéré, ceci afin de pouvoir vérifier si des résultats éventuellement aberrants seraient liés à un manque d'homogénéité de la matière. Lors des essais, les éprouvettes ont été prises au hasard parmi celles déjà usinées.

III - 3.2. : Essais statiques.

III - 3.2.1. Essais de traction.

Du diagramme de traction représenté fig.3-2, on peut déduire les renseignements ci après :

$$R_e = 300 \text{ MPa}$$
$$R_r = 380 \text{ MPa}$$

III - 3.2.2. Essais de torsion.

Deux méthodes expérimentales ont été mises au point. L'une d'elle utilise des moyens extensométriques par jauge de déformation, la machine d'essais de torsion alternée est employée comme machine de torsion statique (fig. 3-3-). Cet essai donne une connaissance assez précise du module de cisaillement G et de la limite élastique en torsion T_e. Il a été effectué avant le début des essais d'endurance en même temps que l'étalonnage de la machine utilisée par M. HARRY. Du tracé de la courbe $C = f(\delta)$ représentée fig. 3-4, on déduit :

$$G = 9,5 \times 10^4 \text{ MPa}$$
$$T_e = 16,5 \text{ MPa}$$

La précision de ces résultats peut être évaluée à 10%.

Figure 3-2 : Courbe de traction ACIER XC 10 f.

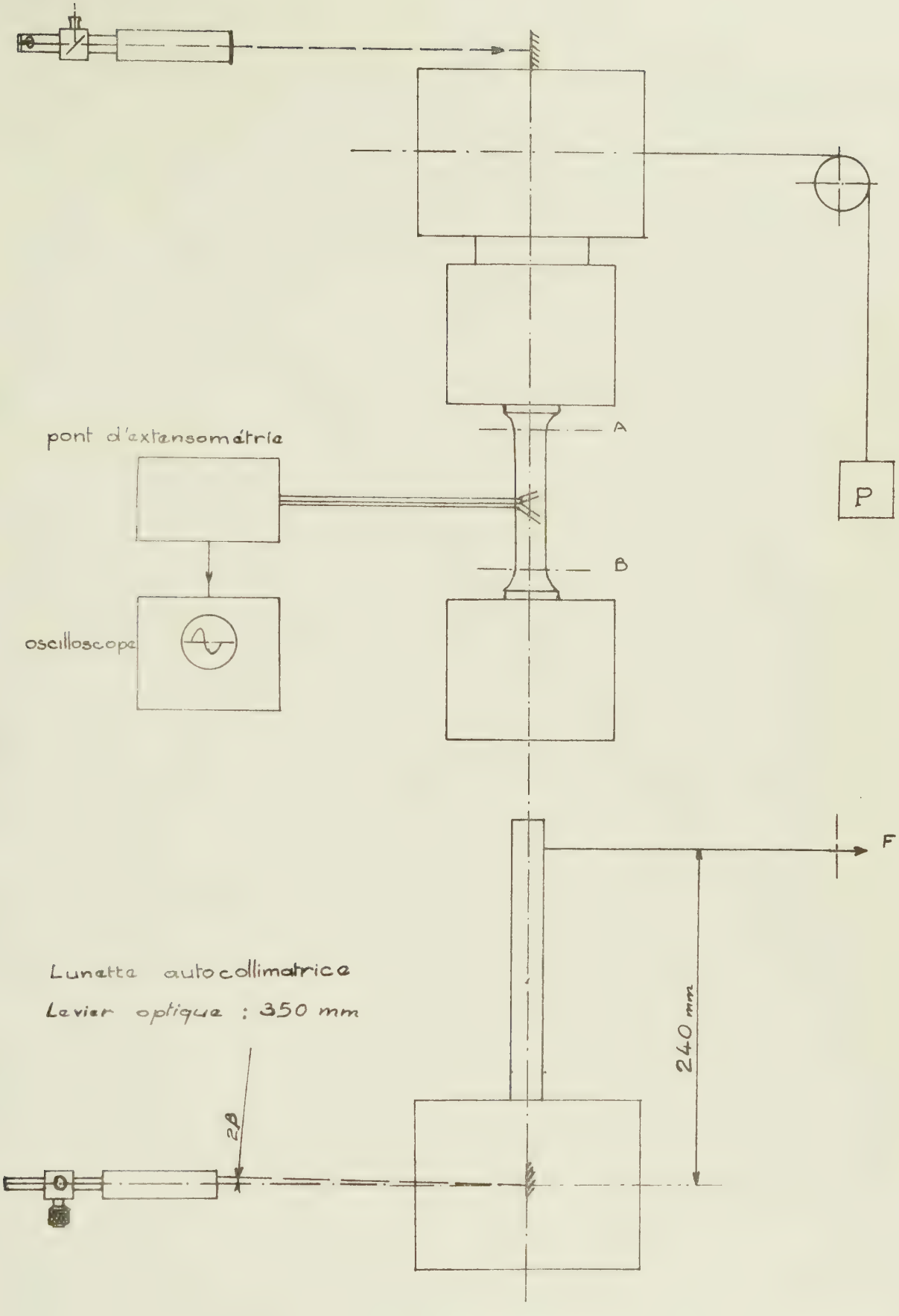


Figure 3-3 : Dispositifs de mesure de torsion statiques

- mesure extensométrique
- mesure optique.

Figure 3-4 :Courbe de torsion de l'acier XC 10 f.

L'autre méthode n'est pas extensométrique. La machine de torsion alternée est employée dans les mêmes conditions, mais au lieu de mesurer le glissement γ comme dans le cas précédent, on mesure la rotation totale β par la méthode du miroir tournant. Il n'est pas possible de déterminer G par cette méthode car on ne peut pas connaître avec précision la longueur active de l'éprouvette : la rotation mesurée β n'est pas seulement la rotation des deux sections A et B de l'éprouvette (fig. 3-3-).

Cependant ce montage m'a permis de vérifier les variations de raideur de l'éprouvette en cours de traitement de fatigue ; G étant lié à cette grandeur, toute variation de l'une entraîne une variation de l'autre.
On remarquera sur la figure 3-5 que les courbes représentant le couple C en fonction de θ ont des pentes voisines à l'exception de la courbe n° 5 qui a été tracée peu avant rupture par fatigue.

III - 3.3. : Tracé de la courbe de WOHLER de l'acier XC 10 f soumis à des sollicitations alternées de torsion.

La figure 3-6 représente ce diagramme qui est indispensable pour les essais ultérieurs par des méthodes statistiques. J'ai en effet indiqué que , quelle que soit la méthode utilisée, il importait de choisir des niveaux d'essai voisins de la valeur cherchée de S provoquant la rupture après N cycles. Une de ces valeurs de la contrainte est particulièrement importante. Il s'agit de la contrainte limite d'endurance conventionnelle à 10^7 cycles. Une bonne estimation de cette limite d'endurance a pu être faite, on trouve

$$S_D = 127 \text{ MPa},$$

valeur très voisine de celle trouvée par M. HARRY (1) dans le cadre de ses essais par mesure d'énergie dissipée ;
Il trouve $S_D = 128$ MPa.

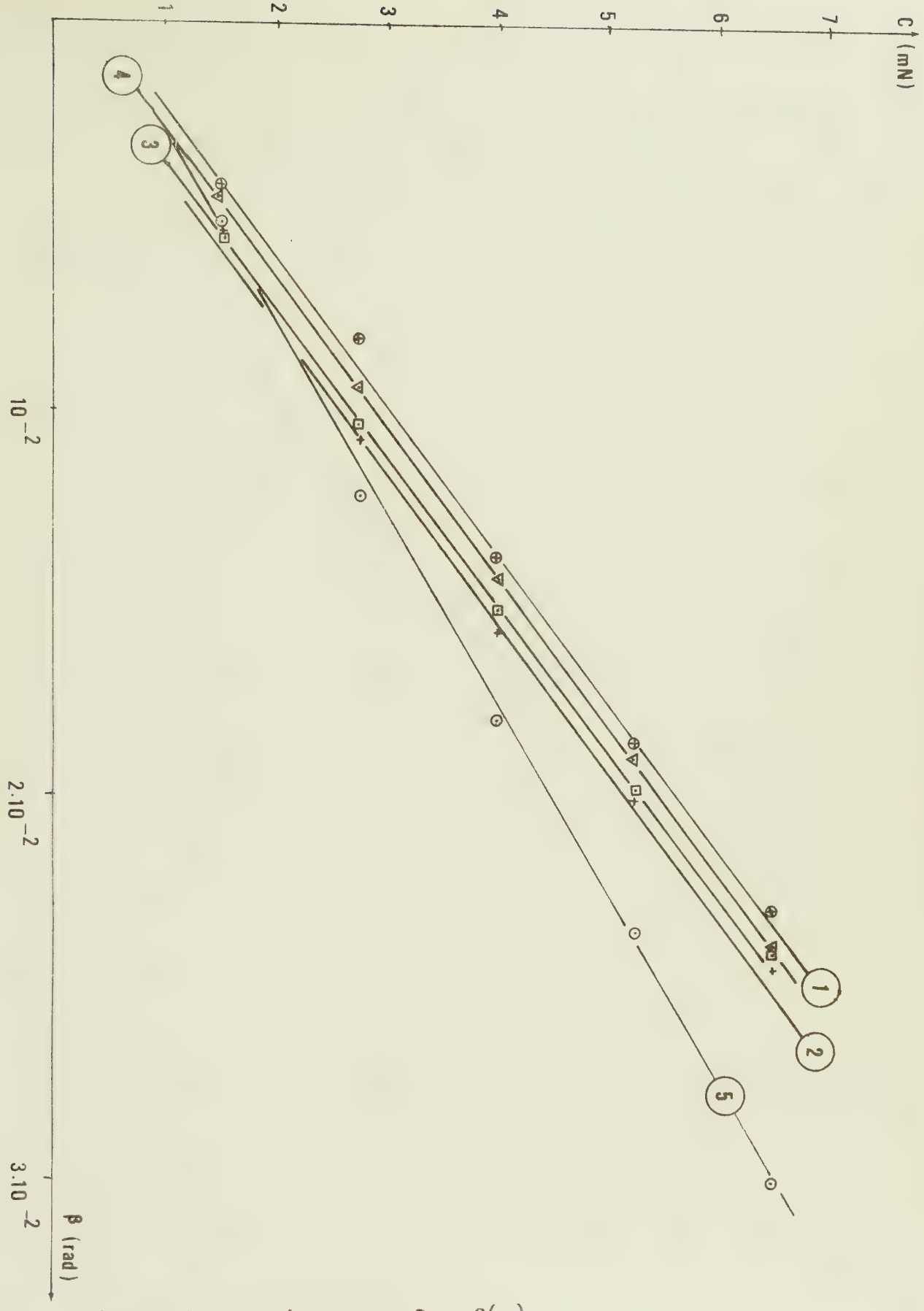


Figure 3-5 : Diagramme C = f( )

1 - Eprouvette vierge
2 - Eprouvette vierge
3 - Eprouvette ayant subi $1,5 \times 10^6$ cycles sous 150 MPa
4 - Eprouvette ayant subi 10^6 cycles sous 80 MPa
5 - Eprouvette ayant subi 3×10^6 cycles sous 150 MPa.

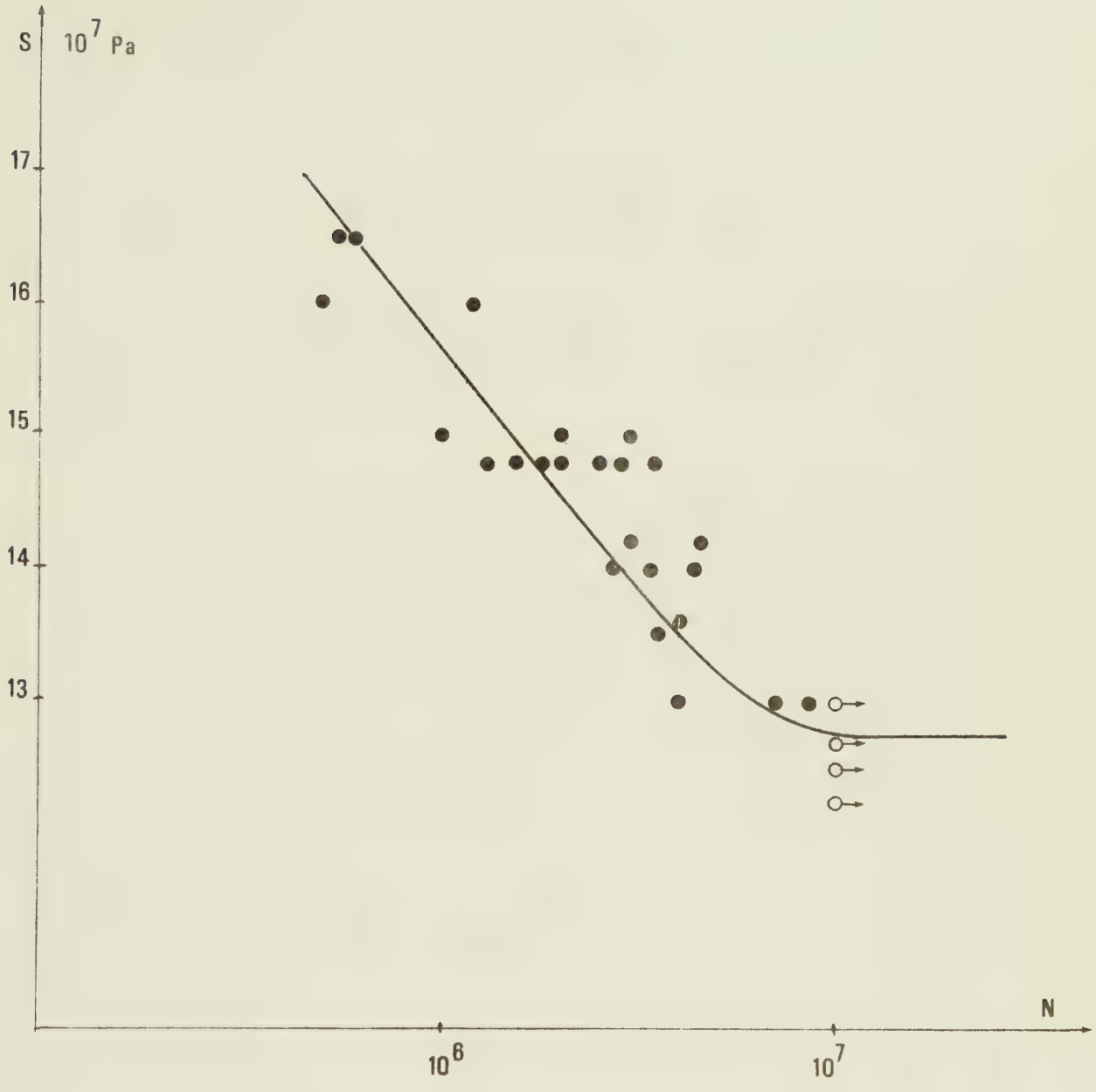


Figure 3-6 : Courbe de WOHLER acier XC 10 f.

Le tracé de la courbe de WOHLER a exigé l'emploi d'une trentaine d'éprouvettes réparties inégalement entre neuf niveaux différents. Il faut remarquer que les sollicitations voisines de 150 MPa ont bénéficié d'un intérêt particulier. Cette valeur, située dans le domaine de l'endurance limitée entre 10^6 et 5×10^6 cycles m'intéressait particulièrement pour mes futurs essais.

III - 4. Définition du programme d'essais.

III - 4.1. : Les buts de ce programme.

Ainsi que je l'ai dit au début de ce chapitre, il semble important de mettre au point un programme d'essais simple et rigoureux permettant d'étudier l'effet de sous charge.

Les essais de fatigue sont longs, en particulier si on travaille dans la zone d'endurance. L'effet de sous charge est souvent défini par une augmentation de la limite d'endurance du matériau prétraité, par rapport à celle du matériau vierge. Si on se tient à ce type d'essai, une étude systématique de l'effet de sous charge et de l'influence des paramètres du prétraitement risque de conduire pour un matériau et un type de sollicitation à un travail expérimental interminable. Il me semble intéressant de vérifier si dans le domaine de l'endurance limitée, l'effet de sous charge se fait également sentir. A première vue rien ne s'oppose à cela ; mais les seuls essais systématiques, effectués à niveaux constants, tels que le traitement de comparaison soit situé dans la zone d'endurance limitée, sont, à ma connaissance, ceux effectués par EPREMIAN et MEHL (18). Il est difficile de considérer, après ce qui en a été dit au paragraphe II - 3.1.1. du présent mémoire, que ces essais aient une signification vis-à-vis du travail que j'envisage.

III - 4.2. : Description des essais.

La méthode la plus stricte pour comparer deux traitements consiste à comparer les distributions des durées de vie résiduelles des échantillons soumis à ces traitements ;

ce procédé est long et délicat. Je m'appuierai sur l'hypothèse qui indique que deux essais qui ne conduisent pas à une proportion identique de ruptures ne peuvent pas être considérés comme équivalents.

III - 4.2.1. Forme des essais - méthode de comparaison.

L'idée générale est de comparer un essai à un seul niveau avec un essai à deux niveaux. Compte tenu des méthodes statistiques décrites au paragraphe III - 2.1., il est très intéressant de considérer la contrainte comme paramètre variable et d'affecter au nombre de cycles n et à la proportion de ruptures p des valeurs constantes. Ce que j'ai convenu d'appeler le prétraitement est défini par les paramètres S_o et n_o, invariables au cours d'un essai. Dans ces conditions, il faut rechercher les sollicitations S_1 et S_2 qui, appliquées pendant le même nombre n de cycles conduisent à la même proportion p de ruptures, rapportée à l'effectif total, deux échantillons dont l'un a déjà subi un traitement.

Je peux schématiser les deux traitements à comparer de la manière suivante : étant donnés deux échantillons E_1 et E_2 représentatifs de la même population d'éprouvettes, je les soumets aux deux traitements définis ainsi :

- E_1 subit le traitement simple (S_1,n) qui produit la proportion p de ruptures ;
- E_2 subit le traitement complexe $(S_o,n_o) + (S_2,n)$ qui produit la même proportion p de ruptures.

En considérant l'hypothèse énoncée plus haut, il est possible de supposer que ces deux traitements sont susceptibles d'avoir des effets identiques sur E_1 et E_2. On peut alors être renseigné sur les effets du prétraitement (S_o,n_o) en comparant les distributions de S_1 et S_2. Il me paraît logique de considérer que si les tendances centrales des distributions ne sont pas significativement différentes, (S_o,n_o) est un traitement nul du point de vue endommagement. Si c'est le contraire qui se produit, soit (S_o,n_o) a un effet destructeur, dans ce cas $S_1 > S_2$, soit (S_o,n_o) conduit à ce que l'on nomme effet de sous charge et on a : $S_1 < S_2$.

III - 4.2.2. Définitions des grandeurs caractéristiques des essais.

Les valeurs choisies pour les paramètres S_o, n_o, n ne sont pas le fait du hasard. J'expliquerai au paragraphe suivant pourquoi S_o et n_o ont été choisis de manière à ne provoquer aucune rupture de leur seul fait.

Pour tous les essais on a :

$$S_o = 80 \text{ MPa}$$

$$n_o = 10^6 \text{ cycles}$$

Le premier essai consistait à vérifier, au niveau de la valeur de la limite d'endurance, l'existence de l'effet de sous charge. La valeur de n est donc la valeur conventionnelle choisie pour déterminer S_D, soit

$$n = N = 10^7 \text{ cycles.}$$

Une valeur approchée de S_D nous est fournie par la courbe de WOHLER ce qui est indispensable pour mener à bien l'étude par les méthodes statistiques. Il est impossible, compte tenu de ce diagramme, d'évaluer de manière sérieuse la valeur de l'écart type dans la zone d'endurance ou dans la zone d'endurance limitée.

Le deuxième essai devait permettre, compte tenu des résultats du premier, de vérifier si ces résultats étaient transposables dans le domaine d'endurance limitée. Compte tenu du diagramme (S, Log n) fig. 3-6, la zone correspondant à une durée de vie de 3×10^6 cycles a été choisie.

Les éprouvettes seront donc réparties en quatre échantillons E_1, E_2, E'_1, E'_2 qui seront soumis aux essais suivants :

- E_1 : 10^7 cycles à des niveaux voisins de 125 MPa
- E_2 : 10^6 cycles au niveau 80 MPa, suivis de 10^7 cycles à des niveaux voisins de la valeur moyenne de S trouvée lors du premier essai.

- E'_1 : 3×10^6 cycles à des niveaux voisins de 145 MPa
- E'_2 : 10^6 cycles au niveau 80 MPa, suivis de 3×10^6 cycles à des niveaux voisins de la valeur moyenne de S trouvée lors de l'essai précédent.

III - 4.2.3. Choix d'une méthode statistique.

Malgré ses très grandes qualités de rigueur, et sa précision, j'ai éliminé dans le cadre de ces essais la méthode des probits (paragraphe III - 2.1.1.). Un calcul rapide indique qu'un essai de 10^7 cycles dure, compte tenu de la fréquence des machines, environ deux jours et demi, donc une détermination de S_D par cette méthode demande environ deux cents jours. Il m'était impossible, compte tenu des moyens dont je dispose, d'envisager l'emploi d'une telle méthode. La méthode d'itération (paragraphe III - 2.1.3.) est la plus rapide de toutes et présente en outre l'avantage de permettre la détermination d'autres quantiles de S que la moyenne $\overline{S}$; mais l'application de cette méthode exige la connaissance de l'écart type de la distribution. Cette dernière condition me la fait rejeter dans ces essais sans pour cela que ce rejet soit définitif. En effet, si les estimations de σ que je trouverai dans les essais effectués ne sont pas significativement différentes, je pourrai dans des épreuves ultérieures, m'en servir pour utiliser cette méthode.

Reste la méthode en escalier (paragraphe III - 2.1.2), plus rapide que la méthode des probits, elle permet de déterminer l'écart type de la distribution. Elle présente cependant un grave inconvénient : elle ne permet de déterminer qu'un seul quantile de la distribution, la moyenne. Dans les essais que j'envisage, je suis tenu à déterminer la valeur de S correspondant à 50% de ruptures sur l'ensemble de l'essai, y compris les éprouvettes pouvant être rompues du fait de (S_o, n_o). C'est-à-dire que si au cours de (S_o, n_o) la proportion de ruptures est p, le quantile à déterminer au cours de la deuxième étape du traitement est la valeur de S provoquant la rupture de la proportion $\frac{0,5-p}{1-p}$ des éprouvettes restantes.

J'ai pensé, pour mettre au point la méthode d'essai, qu'il fallait faire en sorte de ne pas avoir de rupture au cours de (S_o, n_o) de façon à pouvoir employer une méthode suffisamment rapide et porteuse des informations nécessaires pour définir une distribution. Le choix de la méthode en escalier n'est pas nécessairement définitif, en particulier si (S_o, n_o) se rapproche de (S_D, N), il faudra employer une autre méthode pour tenir compte des ruptures dues au prétraitement.

III - 5. Résultats des essais.

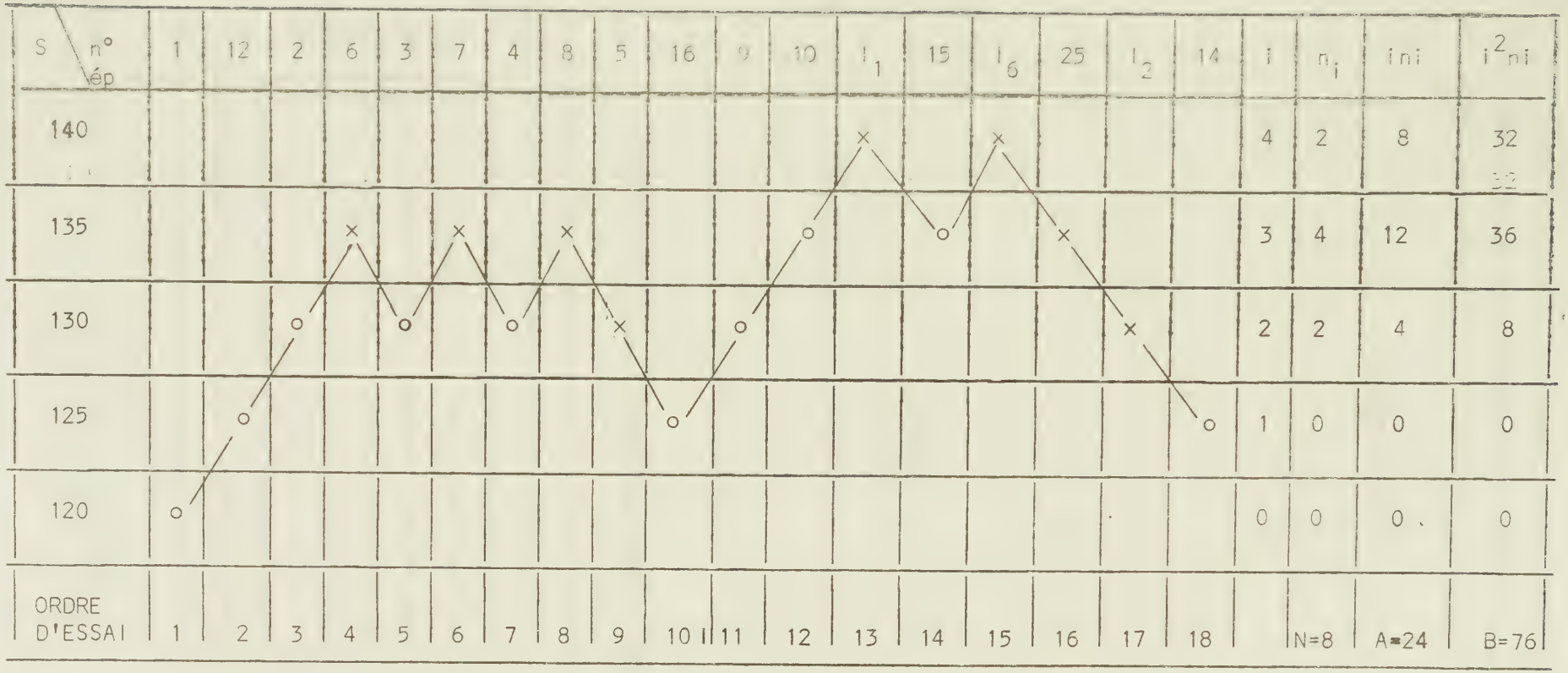
Le premier groupe d'essais comporte, ainsi que je l'ai défini, un essai simple qui est une recherche de limite d'endurance et un essai à deux niveaux, le deuxième niveau étant défini également dans la zone d'endurance et correspondant à 50% de ruptures après 10^7 cycles.

III - 5.1. : Comportement de l'acier XC 10 dans la zone d'endurance.

III - 5.1.1. Résultats de l'essai à un seul niveau.

Dix-huit éprouvettes prises au hasard ont été soumises à un essai selon la méthode de DIXON et MOOD, durant 10^7 cycles. Le matériel nécessaire avait été préparé pour pouvoir effectuer des essais autour du niveau 125 MPa. J'ai choisi un écart d entre les niveaux égal à 5 MPa, cette valeur me paraissant proche de l'écart type, sans qu'il me soit possible de le vérifier sérieusement.

Les essais commencés au niveau 120 MPa se sont poursuivis aux niveaux 125, 130, 135 et 140 MPa ainsi qu'on peut le remarquer sur le tableau de résultats ci-joint. Les quantités i et n_i ont été définies au paragraphe III-2.1.2.



S \ n° ép	1	12	2	6	3	7	4	8	5	16	9	10	I_1	15	I_6	25	I_2	14	i	n_i	ini	i^2ni
140													×		×				4	2	8	32
135				×		×		×				o		o		×			3	4	12	36
130			o		o		o		×		o						×		2	2	4	8
125		o								o								o	1	0	0	0
120	o																		0	0	0	0
ORDRE D'ESSAI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		N=8	A=24	B=76

Tableau III-2 : Résultats d'essais :

XC 10 vierge,

$N = 10^7$ cycles

× rompu

o non rompu

L'éventualité la moins fréquente étant la rupture, c'est le signe moins qui apparaîtra dans l'expression donnant la contrainte moyenne $\overline{S} = S_D$ dans le cas présent

$$S_D = S_o + d\left(\frac{A}{N} - \frac{1}{2}\right)$$

$$S_o = 120$$

$$d = 5$$

$$S_D = 120 + 5\left(\frac{24}{8} - \frac{1}{2}\right)$$

$$S_D = 132,5 \text{ MPa}$$

Calcul de s :

$$s = 1,62\ d\left(\frac{NB-A^2}{N^2} + 0,029\right)$$

On vérifie immédiatement que $\frac{NB-A^2}{N^2} = 0,5$ est supérieur à 0,3. On trouve

$$s = 4,28 \text{ MPa.}$$

III - 5.1.2. Résultats de l'essai à deux niveaux.

Compte tenu des résultats précédents, et faisant l'hypothèse qu'il y avait peu de variations de la distribution, j'ai choisi pour cet essai un écard d = 3 MPa, disposant d'un jeu de masselottes donnant les niveaux 138,5 et 141,5 MPa. Ces contraintes pouvant faire partie du domaine m'intéressant pour l'essai, j'ai complété le jeu avec des masselottes prévues pour 135,5 et 144,5 MPa.

Débutant les essais au niveau 138,5 MPa, j'ai très vite dû abandonner, observant systématiquement des ruptures pour 141,5 MPa et des non ruptures pour 138,5 MPa. J'ai alors repris les essais en choisissant d = 1 MPa, ce qui donne les niveaux 138,5, 139,5, 140,5 et 141,5 MPa.

Vingt éprouvettes ont été engagées dans cet essai. Toutes avaient déjà subi 10^6 cycles sous 80 MPa. Le tableau III-3. résume les résultats.

Les ruptures étant moins fréquentes que les non ruptures, on affectera le signe - dans l'expression de $\overline{S}$.

$$S_o = 138,5 \text{ MPa}$$

$$d = 1 \text{ MPa}$$

$$\overline{S} = 138,5 + 1 \left(\frac{17}{9} - \frac{1}{2}\right)$$

$$\overline{S} = 139,9 \text{ MPa}$$

Calcul de s :

$$\frac{NB-A^2}{N^2} = 0,5$$

donc

$$\frac{NB-A^2}{N^2} > 0,3$$

$$s = 0,93 \text{ MPa}$$

III - 5.1.3. Comparaison des résultats.

Il est possible dès à présent de dire que les deux essais effectués sont susceptibles d'être équivalents.

Si 10^7 cycles sous 132,5 MPa provoquent la même proportion de rupture que 10^6 cycles sous 80 MPa suivis de 10^7 cycles sous 139,9 MPa, on peut dire qu'à première vue le prétraitement a un effet bénéfique et permet une augmentation de la contrainte de 7,4 MPa qui traduisent l'effet de sous charge.

III - 5.2. : Comportement de l'acier XC 10 dans la zone d'endurance limitée.

S en MPa	N° des éprouvettes																				i	n_i	in_i	i^2n_i
	99	70	79	107	95	74	76	106	102	172	170	66	82	103	68	65	101	166	166	84				
141,5						x														x	3	2	6	18
140,5			x		o		x				x						x		o		2	4	8	16
139,5		o		o				x		o		x		x		o		o			1	3	3	3
138,5	o								o				o		o						0	0	0	0
ORDRE ESSAI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		n=9	A=17	B=37

TABLEAU III-3 : Résultats d'essais XC 10 prétraité

$N = 10^7$ cycles

x rompu

o non rompu

De fortes présomptions laissent penser que l'acier XC 10 soumis à la torsion alternée est sensible à l'effet de sous charge, cet effet étant provoqué par 10^6 cycles sous la contrainte de 80 MPa. Il faut vérifier si cet effet se ressent toujours dans la zone d'endurance limitée.

III - 5.2.1. Résultats de l'essai à un seul niveau.

La durée de l'essai ayant été fixée ainsi que je l'ai indiqué au paragraphe III - 4.2.2. à 3×10^6 cycles et la contrainte approchée à 145 MPa, il restait à choisir l'écart entre les niveaux. J'ai arrêté mon choix sur la valeur 5 MPa comme lors du premier essai. Vingt et une éprouvettes sont engagées dans l'essai à partir du niveau 150 MPa, et distribuées entre ce niveau et trois autres qui sont 145, 155 et 160 MPa. Le tableau III - 4 donne les résultats obtenus.

La rupture étant moins fréquente, on affectera le signe - dans l'expression de $\overline{S}$.

$$S_o = 145 \text{ MPa}$$

$$d = 5 \text{ MPa}$$

$$\overline{S} = 145 + 5 \left(\frac{23}{10} - \frac{1}{2}\right)$$

$$\overline{S} = 154 \text{ MPa}$$

Calcul de s :

$$\frac{NB - A^2}{N^2} = 0,41 \text{ est supérieur à } 0,3$$

$$s = 3,56 \text{ MPa}$$

III - 5.2.2. Résultats de l'essai à deux niveaux.

Conservant la même valeur de d que précédemment, j'ai constitué pour cet essai quatre niveaux de sollicitation de manière que le plus bas soit voisin de la valeur $\overline{S}$ trouvée pour l'essai à un niveau. Les vingt et une éprouvettes engagées, après avoir subi (S_o, n_o) sont donc réparties selon les contraintes 155, 160, 165 et 170 MPa.

Les résultats de l'essai sont fournis par le

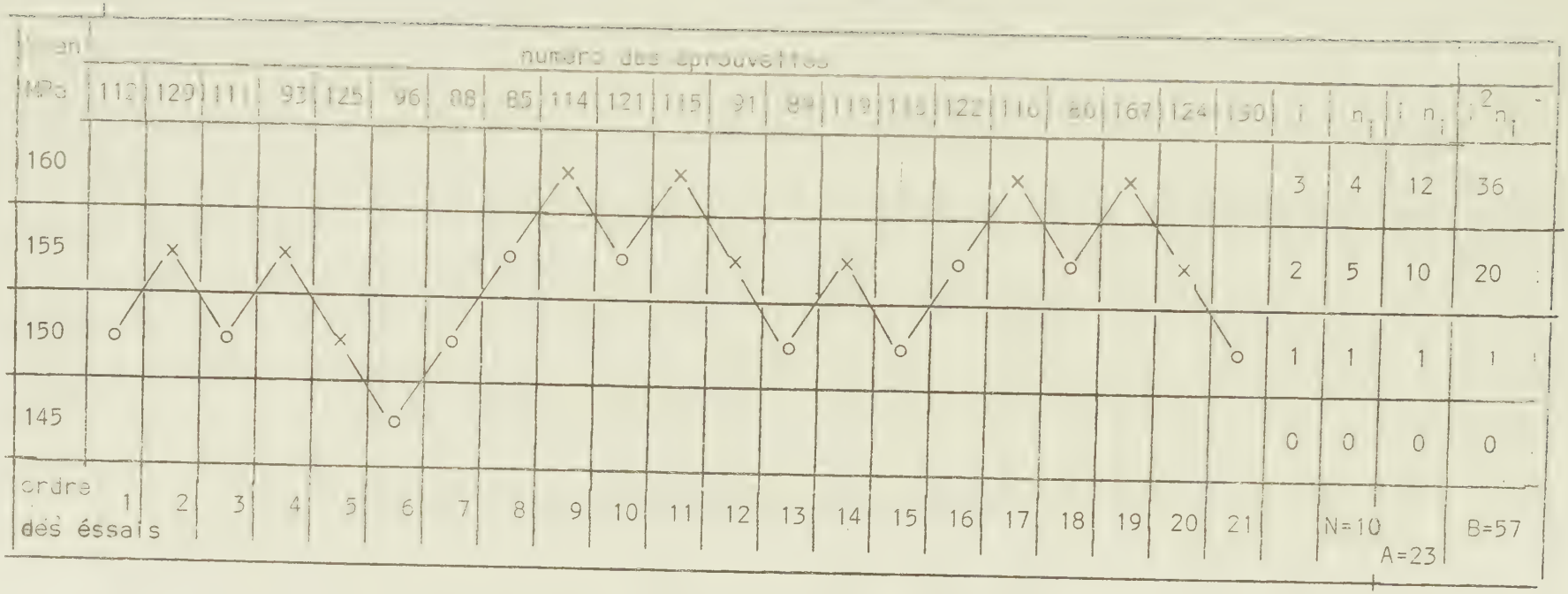


TABLEAU III-4 : Résultats d'essais XC 10 vierge

$N = 3 \times 10^6$ cycles

o non rompu

× rompu

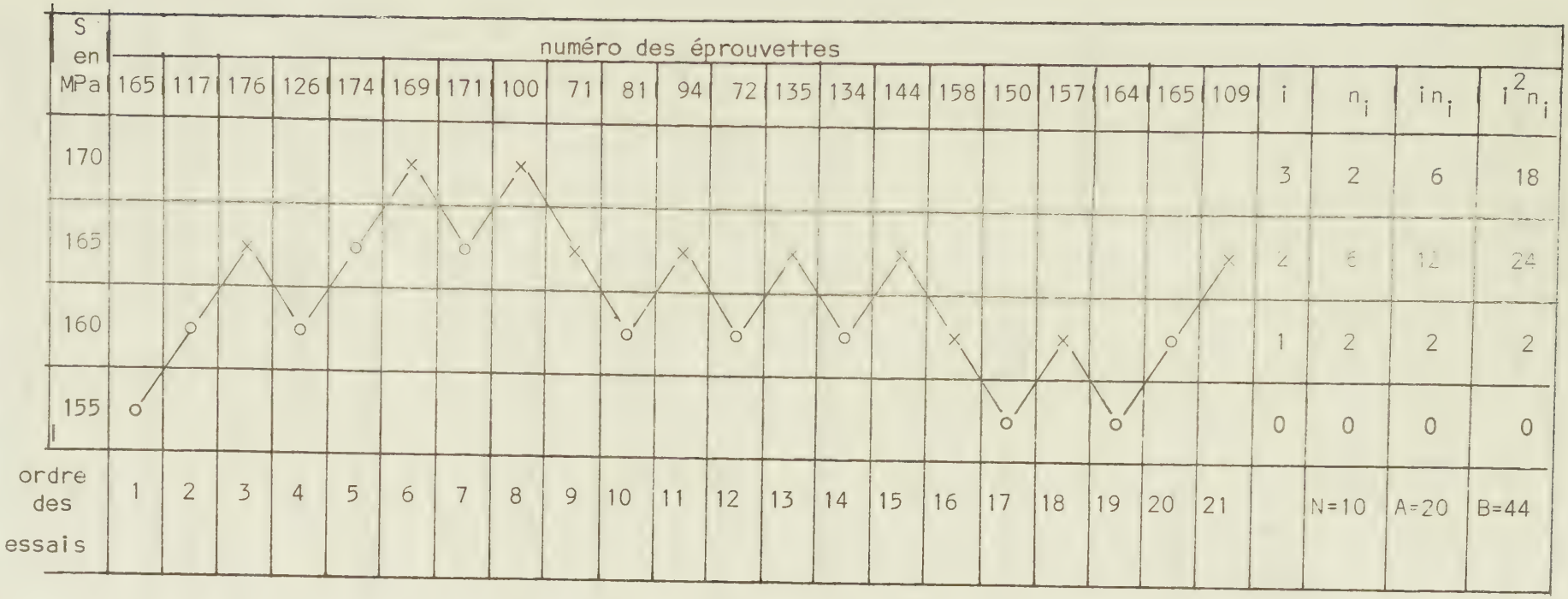


TABLEAU III-5 : Résultats d'essais XC 10 prétraité

$N = 3 \times 10^6$ cycles

o non rompu

x rompu

Là encore, c'est la rupture qui est la moins fréquente et le signe - apparaîtra dans l'expression de $\bar{S}$.

$$S_o = 155 \text{ MPa}$$

$$d = 5 \text{ MPa}$$

$$\bar{S} = 155 + 5 \left(\frac{20}{10} - \frac{1}{2}\right)$$

$$\bar{S} = 162{,}5 \text{ MPa}$$

Calcul de s :

$$\frac{NB-A^2}{N^2} = 0{,}4 \text{ est supérieur à } 0{,}3$$

$$s = 3{,}47 \text{ MPa.}$$

III - 5.2.3. Comparaison des résultats.

Là encore, comme dans la zone d'endurance, on peut remarquer que le prétraitement semble avoir un effet bénéfique sur la tenue à la fatigue de l'acier. L'écart entre les valeurs trouvées pour $\bar{S}$ est de 8,5 MPa ; il est à première vue comparable à l'écart trouvé dans la zone d'endurance.

Avant de conclure sur la méthode d'essais ainsi définie, il est indispensable de vérifier la validité des résultats obtenus.

III - 5.3. : Etude de la validité des résultats.

III - 5.3.1. Généralités.

Lorsque l'on détermine la moyenne et l'écart type d'un échantillon, il ne faut pas perdre de vue que ces deux grandeurs constituent des estimations de la moyenne vraie et de l'écart type de la population. On doit alors considérer que ces estimations sont des variables aléatoires. Il est indispensable, dans ces conditions, de savoir dans quelle mesure la valeur approchée (estimation) est voisine de la valeur vraie s_m.

Pour cela on doit évaluer l'intervalle ε dans lequel est située la valeur de $\bar{S} - S_m$ avec une probabilité donnée. La valeur usuelle de cette probabilité est 0,95. C'est le niveau de confiance de l'estimation. 2 ε est l'intervalle de confiance à 95%.

En d'autres termes il s'agit de déterminer ε tel que :

$$P_r \left\{ (\bar{S} - \varepsilon) < S_m < (\bar{S} + \varepsilon) \right\} = 0,95$$

III - 5.3.2. Méthode de vérification.

Les auteurs de la méthode en escalier ont établi (23) que l'on pouvait déterminer l'estimation s_m de l'écart type o_m de la distribution de $\bar{S}$ et l'estimation s_s de l'écart type o_s de la distribution de s.

$$s_m = \frac{G\ s}{\sqrt{N}}$$

et

$$s_s = \frac{H\ s}{\sqrt{N}}$$

H et G sont donnés par les courbes figure 3 - 7 .

III - 5.3.3. Vérification des résultats des essais dans la zone d'endurance.

Pour le premier essai on a : $\frac{d}{s} = 1,17$

Sur la courbe $G = f\left(\frac{d}{s}\right)$ on trouve G = 1,02

d'où l'écart type de la distribution de S_D :

$$s_m = 1,02 \times 4,28 / \sqrt{8}$$

Soit

$$s_m = 1,5 \text{ MPa}$$

De même H = 1,3 conduit à

$$s_s = \frac{1,3 \times 4,28}{\sqrt{8}}$$

$$s_s = 1,96 \text{ MPa}$$

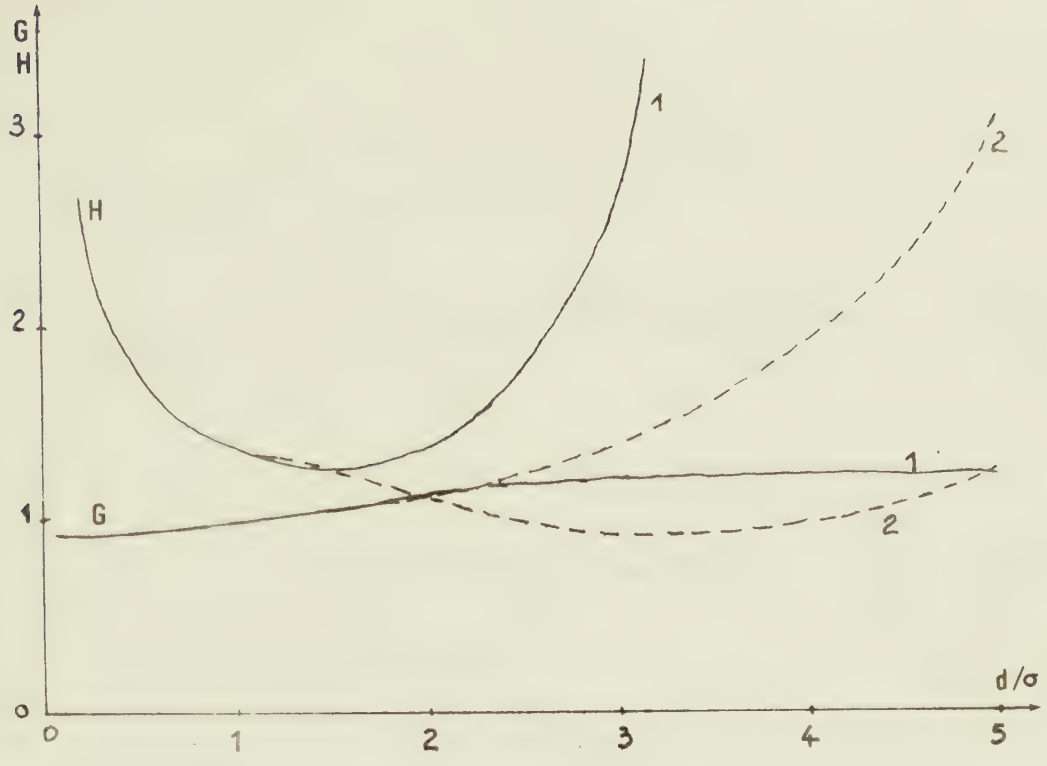


Figure 3-7 : Courbes G et H.

H_1 ou G_1 s'emploient si la moyenne trouvée correspond à un niveau d'essai choisi.

H_2 ou G_2 s'emploient si la moyenne trouvée se situe au milieu de deux niveaux d'essai.

Si la moyenne trouvée est située de manière quelconque entre deux niveaux d'essai, on peut pratiquer une interpolation entre les courbes 1 et 2 pour des valeurs de d/o inférieures à 2.

L'intervalle de confiance à 95% de S_D est donné par

$$S_D \pm t_\alpha \cdot s_m$$

t_c est donné par la table de l'écart réduit pour la valeur $\alpha = 0,05$; $t_\alpha = 1,96$.

La valeur de S_D de la population toute entière est donc comprise avec une probabilité de 0,95 entre les valeurs :

129,5 MPa et 135,5 MPa

Pour le deuxième essai on a : $\frac{d}{s} = 1,07$.

On trouve donc G = 1 et H = 1,35 d'où :

$$s_m = \frac{1 \times 0,93}{\sqrt{9}}$$

$$s_m = 0,31 \text{ MPa}$$

$$s_s = \frac{1,35 \times 0,93}{\sqrt{9}}$$

$$s_s = 0,4185 \text{ MPa}$$

L'intervalle de confiance à 95% est défini par la valeur de ses bornes, soit :

139,3 MPa et 140,5 MPa.

III - 5.3.4. <u>Vérification des résultats des essais dans la zone d'endurance limitée.</u>

On trouve pour l'essai à un seul niveau les valeurs suivantes pour s_m et s_s :

s_m = 1,18 MPa

s_s = 1,47 MPa

L'intervalle de confiance est défini par les valeurs :

151,6 MPa et 156,6 MPa

Pour l'essai à deux niveaux on a :

s_m = 1,16 MPa

s_s = 1,43 MPa

160,2 MPa S_m 164,8 MPa

III - 5.3.5. Conclusions sur la validité des résultats trouvés :

Si on représente sur un axe les valeurs des moyennes et leurs intervalles de confiances, on voit immédiatement (fig. 3-8) qu'il n'y a aucun recouvrement, ce qui me permet de prétendre que les valeurs trouvées sont significativement différentes.

On ne peut pas prétendre la même chose au sujet de l'écart type. Même la valeur s = 0,93 MPa n'échappe pas à cette conclusion. On savait d'ailleurs que la méthode de DIXON et MOOD était assez imprécise pour estimer σ.

III - 6. Discussion du programme d'essais.

Je pense que les buts fixés au début de cette étude sont atteints. J'ai en effet montré que l'acier XC 10 f est sensible à l'effet de sous charge et que ce phénomène se fait aussi bien sentir sur la limite d'endurance que sur toute contrainte de la zone d'endurance limitée.

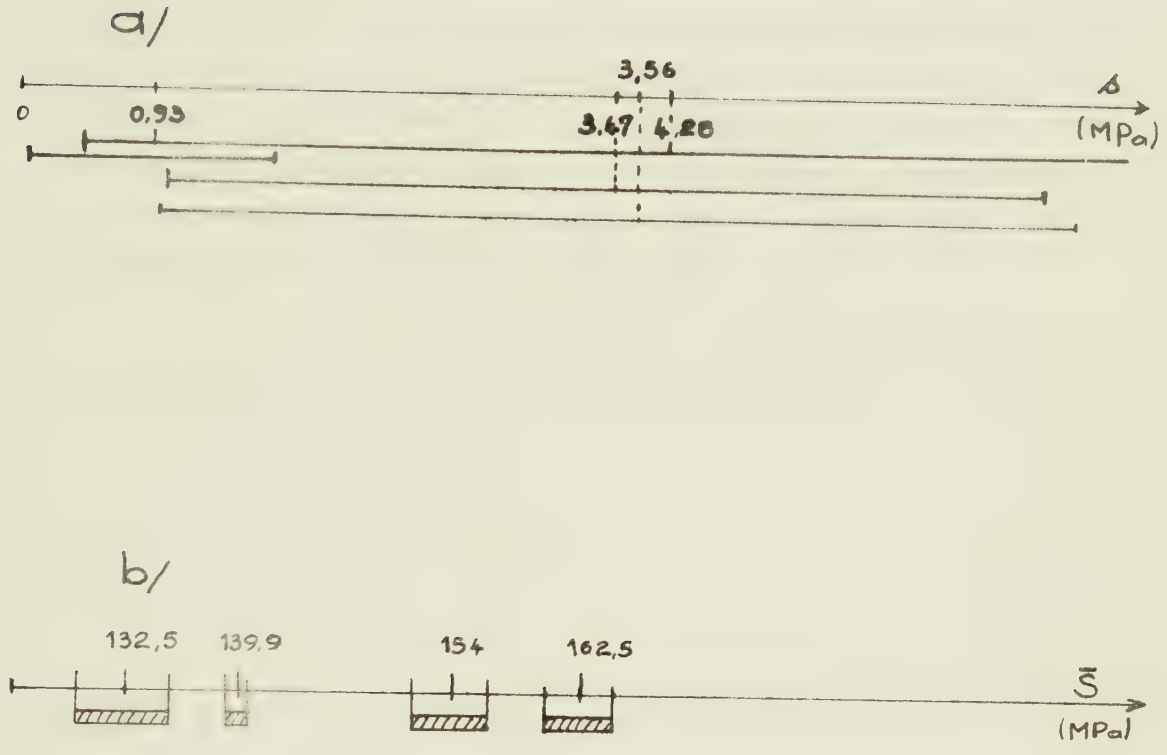


Figure 3-8

a : estimation des écarts-type ; intervalle de confiance

b : estimation des moyennes ; intervalles de confiance

On peut remarquer que l'écart entre les deux valeurs de $\bar{S}$, tant dans la zone d'endurance que dans celle d'endurance limitée, est du même ordre, 7,4 MPa dans un cas et 8,5 dans l'autre. Cela me suggère l'idée que l'on pourrait caractériser l'effet de sous charge par cet écart.

Un autre fait me semble important, l'écart type dans la zone d'endurance limitée semble identique pour les deux essais ; on peut admettre que si les paramètres S_o et n_o varient, il restera sinon identique, du moins voisin de la valeur que j'ai trouvée, cela permet d'envisager l'emploi de la méthode d'itération, en particulier dans les cas où le prétraitement fera apparaître des ruptures.

Des essais entrepris actuellement semblent me confirmer que la valeur de σ varie peu.

CONCLUSION

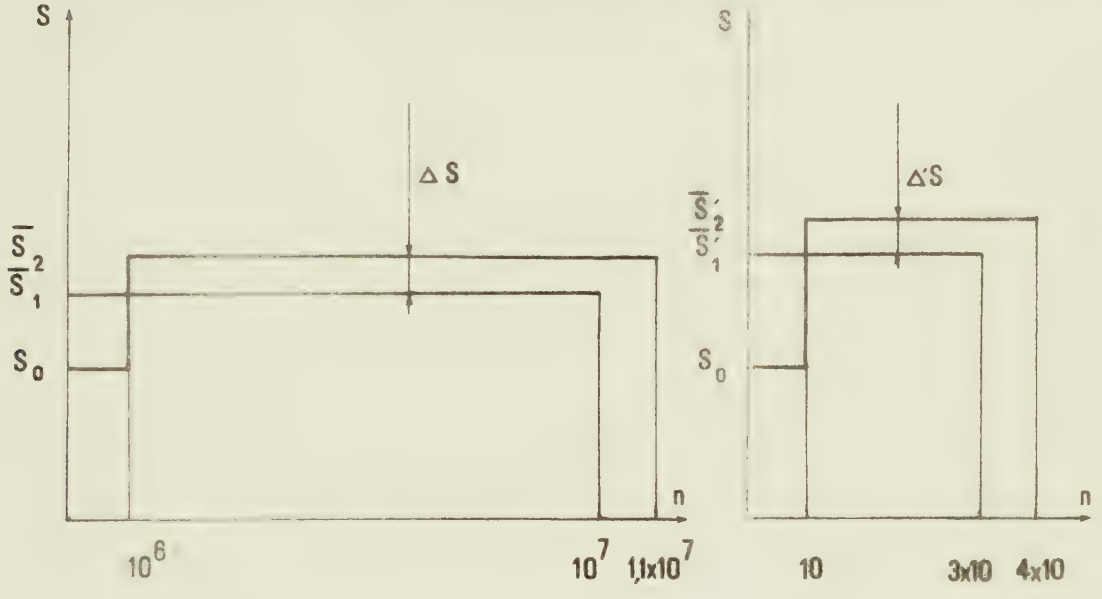
L'effet de sous charge, objet de cette étude, n'est pas caractéristique du comportement de tous les métaux, et même, pour un type de métal peut dépendre largement du type d'essai. Certains auteurs ont détecté sa présence, sans faire appel aux méthodes statistiques. Ils ont tenté d'expliquer le phénomène, mais en aucun cas ils n'ont essayé d'en entreprendre la mesure. Les méthodes statistiques peuvent permettre cette mesure, à condition toutefois que la méthode d'essais soit cohérente avec ce que l'on sait par ailleurs des distributions des populations soumises au traitement de fatigue.

Le but que je m'étais fixé était la mise au point d'une méthode d'essais, et je pense que le travail présenté ici correspond bien à ce but. Dans un premier temps j'ai déterminé que l'effet de sous charge se traduisait par une augmentation ΔS de la limite d'endurance conventionnelle de l'acier XC 10 ; dans une deuxième série d'essais, je montre que le même traitement de sous charge entraine une augmentation de la contrainte provoquant 50% de ruptures, par rapport à l'effectif total, pour un essai d'une durée de 3×10^6 cycles, c'est-à-dire appartenant au domaine d'endurance limitée.

Considérant que ce dernier type d'essais rend compte du phénomène de sous charge, je compte le conserver pour en entreprendre l'étude systématique. Cette étude est absolument indispensable actuellement, car on a très peu de données à ce sujet. Il est important de déterminer avec précision quelle est l'influence de la durée du traitement de sous charge, en particulier cet effet est-il une fonction monotone de la durée, ou bien existe-t-il une valeur de n qui le rende maximum ? Le même genre de questions se posent à propos du niveau du traitement de sous charge ; en particulier doit on considérer que plus ce niveau est proche de la limite d'endurance, plus l'effet est important ? Ce qui peut poser un problème si on considère qu'un prétraitement au delà de la limite d'endurance, mais pouvant en être proche, provoque l'effet de surcharge. Le programme des essais envisagés

consistera donc à faire varier l'un après l'autre les paramètres S et n du traitement de sous charge et à enregistrer pour les comparer les valeurs de ΔS obtenues à l'issue d'un traitement dont la durée est 3×10^6 cycles. Il sera intéressant de noter au cours de ce travail si plusieurs traitements de sous charge ne conduisent pas à la même valeur de ΔS, car alors on pourra envisager l'existence de traitements équivalents.

Cela serait d'autant plus intéressant que se vérifierait un fait remarqué au cours de mes essais ; les schémas ci-dessous permettent de traduire ce fait :



Essai n° 1 Essai n° 2

Les valeurs ΔS et $\Delta' S$ remarquées dans les deux séries d'essais sont voisines, elles diffèrent en effet d'environ 10% ce qui inciterait à penser qu'elles ne sont pas significativement distinctes. L'idée vient, compte tenu de cela, de vérifier si le même traitement de sous charge ne produirait pas le même écart ΔS au cours d'un traitement de comparaison différent de ceux envisagés jusque là. Si cela était, on serait alors en droit de caractériser un effet de sous charge par l'écart ΔS produit au cours d'un quelconque traitement de comparaison. On disposerait ainsi par ce moyen d'une mesure de l'effet de sous charge.

Ces essais sont d'un grand intérêt ; leurs résultats, complétant les résultats des essais qui ont été décrits plus haut, pourraient conduire à une représentation simple de l'effet de sous charge sous la forme d'un "dommage négatif" par exemple.

Cette étude doit être conduite d'abord pour un acier et pour un type de sollicitation donnés (XC 10 f, torsion alternée) afin de posséder un ensemble de résultats parfaitement comparables dans un cadre bien déterminé. Disposant alors d'une base de comparaison bien établie, il serait possible alors d'étendre cette étude à d'autres matériaux et envisager d'autres sollicitations.

BIBLIOGRAPHIE

(1) - J. BRUNET - Contribution à l'étude de la fatigue par examen de la capacité d'amortissement.
Thèse doctorat 3ème cycle en Physique - Université de BORDEAUX I
Juillet 1973 - n° ordre 1057.

(2) - R. HARRY - Etude du comportement thermique d'une éprouvette au cours d'un essai de fatigue.
Thèse Docteur Ingénieur - Université de BORDEAUX I
Septembre 1974 - n° ordre 208.

(3) - R. CAZAUD - G. POMMEY - P. RABBE - CH. JANSSEN - La fatigue des métaux - Ed. DUNOD
chap. 1 pages 1 à 8.

(4) - La fatigue des métaux - Op. cité (3)
chap. 3 pages 106 à 108.

(5) - E. PLENARD et J. CHAPOUTHIER - Divers processus d'absorption d'énergie d'un métal soumis à des sollicitations dynamiques.
GAMI N° 3 - 1966.

(6) - RAVILLY - Contribution à l'étude de la rupture des fils métalliques soumis à des torsions alternées.
Publication Scientifique du Ministère de l'Air - 1938 - n° 120.

(7) - J.P. VILLAIN et J. de FOUQUET - Evolution de la capacité d'amortissement du fer faiblement carburé après un essai de fatigue par torsion alternée.
Mémoire scientifique - Revue de Métallurgie n° 59 - 1962.

(8) - N.F. MOTT - Une théorie sur l'origine des fissures de fatigue.
ACTA Métallurgia - Vol. 6 - mars 1958.

(9) - F. BASTENAIRE - Etude statistique et physique de la dispersion des résistances et des endurances à la fatigue.
Thèse de Docteur ès Sciences Physiques
Université de PARIS - 1960 n° 4313.

(10) - A.M. FREUDENTHAL et E.J. GUMBEL -
On the statistical interpretations of fatigue tests.
Proc. Roy. Soc. A 216 - 1953.

(11) - W. WEILBULL - A statistical representation of fatigue failures in solids.
Kungl Tekniska Högskolaus Haudligar
Stockholm, 1949.

(12) - E.J. GUMBEL - The statistical theories of extreme walues and some practical applications.
Applied Mechanics serie n° 53
1954, Washington.

(13) - M.A. MINER - Cumulative damage in fatigue.
J. Appl. Mech. 12 - 1945.

(14) - D.L. HENRY - A theorie of fatigue damage accumulation in steel.
Trans. ASME 77 - 1955.

(15) - F. BASTENAIRE et M. WEISZ -
Contribution à l'étude de l'aspect statistique de la fatigue.
Revue de Métallurgie 55 n° 8 - 1958.

(16) - F.B. STULEN - On the statistical nature of fatigue
ASTM Special Technical Bulletin
n° 121 (1952).

(17) - F. BASTENAIRE - Etude critique de la notion de dommage appliquée à une classe étendue d'essais de fatigue.
Colloque de fatigue IUTAM -
Stockholm - 1955.
Edit. Springer Verlar - Berlin.

(18) - E. EPREMIAN et R.F. MEHL -
A statistical interpretation of the effect of understressing on fatigue strength.
ASTM - Special Technical Publication
n° 137 - 1953.

(19) - FERRO et ROSSETTI -
Contribution à l'étude de la fatigue des matériaux avec essais à charge progressive.
Colloque de fatigue IUTAM -
Stockholm 1955.

(20) - N.M. NEWMARK - A review of cumulative damage in fatigue ; Fatigue and fracture of metals, 10, p. 197 - New York - 1952.

(21) - F. BASTENAIRE- Résultats de l'étude du dommage par fatigue effectué par la commission de fatigue des métaux de la Société Française de Métallurgie.
Rapport IRSID RE_3 1964.

(22) - D.J. FINNEY - Probit analysis.
Cambridge University Press - 1952.

(23) - W.J. DIXON et A.M. MOOD -
A method for obtaining and analysing sensitivity data.
Journal of the American Statistical Association - Vol. 43 - p. 109 - 126 - 1948.

(24) - H. ROBBINS et S. MONRO -
A stochastic Approximation Method.
Annales of Math. Stat. 22 p. 400 - 407 1951.

(25) - F. BASTENAIRE - Etude sur la précision d'une méthode d'approximations successives pour la détermination d'un paramètre.
Revue de Stat. appliquée - Vol. 1 - n° 3-4 p. 63 - 73 - 1953.

A BORDEAUX, le

Vu, le Président de l'Université
de BORDEAUX I